

Titre: Développement d'un outil de simulation pour la conception de
préformes par tissage 3D

Auteur: Julien Brazeau-Séguin

Date: 2018

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Brazeau-Séguin, J. (2018). Développement d'un outil de simulation pour la
conception de préformes par tissage 3D [Mémoire de maîtrise, École
Citation: Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3783/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3783/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Louis Laberge Lebel
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE SIMULATION POUR LA CONCEPTION DE
PRÉFORMES PAR TISSAGE 3D

JULIEN BRAZEAU-SÉGUIN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE SIMULATION POUR LA CONCEPTION DE
PRÉFORMES PAR TISSAGE 3D

présenté par : BRAZEAU-SÉGUIN Julien

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DANSEREAU Jean, Ph. D., président

M. LABERGE LEBEL Louis, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. ROBITAILLE François, Ph. D., membre

DÉDICACE

À mes parents pour leur soutien inconditionnel.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes collègues de labo avec qui j'ai eu la chance d'avoir une très belle ambiance de recherche tout le long de ma maîtrise. Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui ont rendu possible la réalisation de mon mémoire. Mon partenaire d'affaires, Alexandre, pour sa patience et flexibilité. Le GroupeCTT pour leur soutien à tous les niveaux. Le centre de recherche CREPEC et l'organisme MITACS pour leurs soutiens financiers. Mon directeur, Louis, d'avoir toujours cru en moi !

RÉSUMÉ

Les préformes 3D tissées sont reconnues pour leur grande résistance aux impacts et leur légèreté. Malgré l'augmentation de l'intérêt pour ce type de structure, le partenaire industriel, le GroupeCTT possède peu d'outils rapides et efficaces pour modéliser la géométrie des tissus 3D avec précision. Les modèles actuels nécessitent soit de caractériser la structure complète du tissu à modéliser ou requièrent de très grandes capacités de calculs numériques. Ainsi, le développement d'un outil de simulation pour la conception de préformes 3D tissées a été effectué. Les sections des fils sont représentées à l'aide d'une super-ellipse. La trajectoire de ces fils se base sur le principe de corde sous tension générale. L'intensité de l'ondulation des fils est basée sur un ratio de tension. Une analyse du fonctionnement du métier à tisser numérique et une caractérisation préliminaire des tissus interlock 3D ont été réalisées. L'influence des paramètres d'avance du tissu et d'espacement du peigne sur la géométrie des tissus 3D s'est révélée critique. Le modèle géométrique développé se base sur ces deux paramètres critiques et sur des tendances observées dans la littérature. Une validation expérimentale de la version initiale de ce modèle a été effectuée. Actuellement, le modèle permet de générer rapidement des tissus 3D. De plus, pour les tissus orthogonaux, l'approche géométrique développée permet de simuler leur géométrie avec précision, soit de 11% d'écart pour la largeur des fils de chaînes, 4% d'écart pour la largeur des fils de trame, 8% de la largeur des fils de liage et 0,2% d'écart pour la valeur d'épaisseur moyenne. Puis pour les tissus 3D à angle, la précision du modèle doit être améliorée. La première amélioration de modélisation de ce type de tissu est d'implémentation d'une rotation de la section des fils.

ABSTRACT

Near net shape design capabilities and good damage tolerance are two distinctive strengths of 3D woven interlock fabrics. Actually, there is limited solutions for the industrial partners, the CTTGroup, to produce a 3D model rapidly and accurately of those fabrics. Actual modelling approaches rely on heavy fabrics characterization or on intensive computational resources. A geometric model has been developed to fulfill the industrial partners requirements. The fabric take up and reed spacing has been identified as critical manufacturing parameters that have a direct impact on the fabric geometry. The model was then developed base on those parameters. The cross-section of the yarns are model using a superellipse equation. The yarn path is following a rope in tension concept. The yarns crimp are controlled with tension ratio implemented in the model. A validation of the initial development of the model has been realized. The model has the ability to produce 3D fabrics rapidly and with good precision for orthogonal woven fabrics under 1% error for the fabric thickness. For the angle woven fabrics, future work, such as yarn rotation, is required to reproduce them more accurately.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte du projet	1
1.2 Problématique des renforts 3D tissés	2
1.3 Objectif principal : Développement d'un outil de simulation pour la conception de préformes par tissage 3D	3
1.4 Plan du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DES TEXTILES TISSÉS 3D ET LEUR MODÉLISATION	4
2.1 Définitions des textiles tissés 3D	4
2.1.1 Définitions générales	4
2.1.2 Définition du métier à tisser 3D	7
2.2 Approches de modélisation	9
2.2.1 Introduction	9
2.2.2 Géométrie : TexGen	9
2.2.3 Mécanique : Éléments numériques	10
2.2.4 Hybride : Wisetex	11
2.2.5 Résumé des principales approches de modélisation	13

CHAPITRE 3 FABRICATION ET CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE DE TISSUS INTERLOCK 3D À L'AIDE D'UN MÉTIER À TISSER NUMÉRIQUE . . .	15
3.1 Introduction	15
3.2 Fonctionnement du métier à tisser	15
3.2.1 Composant d'un métier à tisser numérique	15
3.2.2 Passage des fils de chaîne	21
3.2.3 Paramètres critiques	22
3.3 Production des tissus	23
3.3.1 Préparation du métier	23
3.3.2 Tissage d'un tissu 3D	23
3.3.3 Découpe des tissus	24
3.4 Analyse de l'influence des paramètres	24
3.4.1 Caractérisation préliminaire dimensionnelle des tissus	24
3.4.2 Résultats et analyse	26
3.4.3 Taux de couverture des fils	27
3.5 Conclusion	28
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DES STRUCTURES TISSÉES 3D	30
4.1 Introduction	30
4.2 Structure du modèle	30
4.3 Paramètres d'entrée	32
4.3.1 Valeurs d'entrée exigées (EasyJC)	32
4.3.2 Paramètres du modèle	35
4.4 Section des fils	38
4.4.1 Définition de la section	38
4.4.2 Détermination des variables d'une superellipse	39
4.4.3 Calcul de la demi-hauteur des sections	40
4.5 Trajectoire des fils	42
4.5.1 Principe de corde sous tension	42
4.5.2 Interactions entre les fils	44
4.6 Génération du 3D	45
4.6.1 Analyse de convergence du maillage	46
4.7 Conclusion	47
CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE	49
5.1 Introduction	49

5.2	Fabrication de plaques composites renforcées de tissus 3D	49
5.2.1	Conception et fabrication d'un moule d'injection	50
5.2.2	Injection des tissus	54
5.3	Polissage des tissus	56
5.3.1	Procédure de polissage	56
5.4	Analyse de la mésostructure	58
5.4.1	Comparaison des taux de fibres	58
5.4.2	Comparaison des dimensions géométriques	65
5.5	Conclusion	73
CHAPITRE 6 CONCLUSION		74
6.1	Synthèse du développement d'un outil de simulation	74
6.2	Limitations du modèle proposé	75
6.3	Améliorations futures de la modélisation des tissus 3D	76
RÉFÉRENCES		77
ANNEXES		85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Principales approches de modélisation des textiles tissés	13
Tableau 3.1	Propriétés des tissus types sélectionnés permettant de quantifier l'influence des paramètres de fabrication ciblés	24
Tableau 3.2	Présentation des données géométriques mesurées sur des tissus 3D types	26
Tableau 3.3	Présentation du taux de couverture de la largeur des fils en fonction des paramètres d'avance (trames) et l'espacement du peigne (chaînes)	28
Tableau 4.1	Structure du fichier typefil.csv	33
Tableau 4.2	Structure du fichier trame.csv	33
Tableau 4.3	Structure du fichier chaîne.csv	33
Tableau 4.4	Présentation des exposants du modèle permettant de définir la courbure des sections 2D des fils	39
Tableau 5.1	Déplacements maximaux des différents renforts testés en éléments finis	52
Tableau 5.2	Présentation des taux de fibres calculés à partir des sections critiques des tissus analysés	62
Tableau 5.3	Comparaison des dimensions globales du tissu NCS-2	66
Tableau 5.4	Comparaison des dimensions externes des fils du tissu NCS-2	67
Tableau 5.5	Comparaison des dimensions externes des fils du tissu SERGÉ-3	70
Tableau 5.6	Comparaison des dimensions globales du tissu SERGÉ-3	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Présentation des composants du moteur <i>LEAP</i> fabriqués à l'aide de tissus 3D interlock	1
Figure 2.1	Présentation visuelle des principaux renforts textiles (adaptée de[1]) .	4
Figure 2.2	Présentation des trois types de fils des tissus 3D interlock	5
Figure 2.3	Présentation des trois exemples types d'armures couramment utilisées pour fabriquer des textiles tissés 2D et 3D	6
Figure 2.4	7
Figure 2.5	Présentation des trois étapes de fabrication d'un tissu 2D et 3D . . .	8
Figure 2.6	Présentation d'un tissu OTP modélisé avec le logiciel Texgen 3.8.2 . .	10
Figure 2.7	Présentation d'un tissu OTP partiellement relaxé à l'aide du logiciel de modélisation mécanique DFMA (version 0.5.1)	11
Figure 2.8	Présentation d'un tissu OTP avec ondulation de ses fils de trames à l'aide du logiciel Wisetex 3.2	12
Figure 3.1	Représentation globale des composants principaux d'un métier à tisser 3D	16
Figure 3.2	Exemple simplifié et réduit d'un cantre contenant 72 bobines de fils de chaîne	17
Figure 3.3	Présentation du sous-système permettant de déplacer verticalement les fils de chaîne	18
Figure 3.4	Présentation des dimensions critiques et la différence de grandeur des peignes avant et arrière	19
Figure 3.5	Représentation simplifiée des mécanismes de traction des tissus 3D .	21
Figure 3.6	Représentation du passage de deux fils de chaîne en rouge dans tous les composants principaux d'un métier à tisser 3D	22
Figure 3.7	Représentation numérique du tissu NCS-2 et du tissu SERGÉ-3 . . .	25
Figure 4.1	Présentation des 4 grandes étapes consécutives du modèle permettant de modéliser un tissu 3D	31
Figure 4.2	Présentation de l'interface du logiciel EasyJC permettant de définir l'architecture du tissu à fabriquer	32
Figure 4.3	Présentation de la nomenclature des fichiers <i>CSV</i> générés par le logiciel EasyJC pour un tissu 3D interlock NCS	34
Figure 4.4	Représentation de l'approche choisie pour calculer le taux de fibre surfacique d'un fil dans le modèle	35

Figure 4.5	Représentation des paramètres critiques sur un tissu démonstrateur de type NCS	36
Figure 4.6	Représentation de l'influence du ratio de tension sur l'épaisseur (Z) à l'aide d'une vue du plan YZ du tissu 3D démonstrateur de la figure 4.5	37
Figure 4.7	L'influence du ratio de tension sur un tissu ayant une armure de type <i>toile</i> sur 3 couches	37
Figure 4.8	Représentation d'une section de fils divisée en quatre quadrants différents afin de constater visuellement l'influence des valeurs des exposants m et n sur la courbure de la section.	39
Figure 4.9	Représentation d'une courbe elliptique générée à l'aide des équations 4.1 et 4.2 développés	40
Figure 4.10	Représentation du principe de corde sous tension d'un fil de liage contournant les sections des fils de trame dans le plan XZ	43
Figure 4.11	Illustration de l'algorithme de tangence développé afin d'optimiser le parcours des fils de liage	43
Figure 4.12	Implémentation d'un nouveau l'algorithme de tangence à l'ondulation des fils de trame	44
Figure 4.13	Présentation de la définition de la surface rectangulaire S1 délimitée par quatre points 1,2 et 25,26 de deux sections adjacentes d'un fil de trame	45
Figure 4.14	Étude de convergence du raffinement du maillage du modèle	47
Figure 5.1	Présentation des pièces composites à renfort 3D à fabriquer	49
Figure 5.2	Présentation des deux versions de moule développées pour fabriquer des plaques composites de 12x12po	50
Figure 5.3	Illustration du positionnement des 7 points critiques, en rouge, à analyser la déformation du couvercle du moule	51
Figure 5.4	Présentation des renforts testés dans le logiciel d'éléments finis ABAQUS	53
Figure 5.5	Présentation de la vue globale de la solution finale envoyée en usinage	54
Figure 5.6	Illustration des étapes principales de fabrication des préformes 3D en pièces composites	55
Figure 5.7	Présentation du format cylindrique requis pour polir un échantillon .	56
Figure 5.8	Présentation du plan de polissage permettant d'analyser section par section le tissu NCS-2	57
Figure 5.9	Présentation des sections utilisées pour l'analyse de la mésostructure des tissus	59

Figure 5.10	Comparaison d'une image à 25X et 200X d'une section XZ du tissu NCS-2	60
Figure 5.11	Présentation d'exemples de polygones tracés pour chacune des sections analysées	61
Figure 5.12	Présentation de l'influence du fil de liage sur le taux de fibres des fils de trame de la section XZ5	63
Figure 5.13	Présentation de la vue isométrique des différents tissus modélisés pour cette analyse comparative	65
Figure 5.14	Comparaison du plan de coupe YZ1 du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux	68
Figure 5.15	Comparaison du plan de coupe XZ5 du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux	69
Figure 5.16	Comparaison du plan de coupe XZ du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux	72
Figure 5.17	Présentation du liage intercouche permettant de relier deux couches ensemble du tissu 3D SERGÉ-3	73

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
a	Demi-largeur d'un fil
ACC	Angle Couche à Couche
ACM	Automated composites manufacturing
ATP	Angle à Travers la Profondeur
b	Demi-hauteur d'un fil
CSV	Comma-Seperated Values
CTT	Centre de Transfert Technologique
d_{fibre}	Diamètre d'une fibre
ET	Standard Tessellation Language
K	10^3
LabSFCA	Laboratoire de Structure de Fibres et de Composites Avancés
m	Exposant du cosinus de l'équation d'une super-ellipse
mpx	Mégapixels
n	Exposant du sinus de l'équation d'une super-ellipse
nb_{fibre}	Nombre de fibres
NCS	Non Crimp Structures
OCC	Orthogonal Couche à Couche
OTP	Orthogonal à Travers la Profondeur
RTM	Resin Transfert Moldign
STL	Écart-Type
$vecF_n$	Force de compression
$vecF_s$	Force de cisaillement
Tfmin	Taux de fibre minimum
Tfmax	Taux de fibre maximum
Tfmoy	Taux de fibre moyen

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	ÉTUDE DES MODÈLES	85
Annexe B	EXEMPLE DE PRISE DE MESURE SUR UNE IMAGE D'UN TISSU	88
Annexe C	ÉTUDE D'UNE SECTION DE FIL DIVISÉE EN QUADRANT . . .	89
Annexe D	ARTICLE 1 : RELATING WEAVING PARAMETERS AND 3D WO- VEN FABRIC DESIGN WITH A GEOMETRICAL MODELLING APPROACH	92
Annexe E	DESIGN DU MOULE À ÉPAISSEUR VARIABLE	103
Annexe F	PLAN DU MOULE RTM-CADRE	106
Annexe G	SECTIONS COMPLÈTES DU TISSU NCS-2	113
Annexe H	PRÉSENTATION DES DONNÉES SUR LES TAUX DE FIBRES DES FILS MESURÉS	125

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du projet

Les préformes textiles tridimensionnelles (3D) sont de plus en plus utilisées pour fabriquer des pièces composites dans plusieurs industries [2, 3]. Les structures textiles 3D sont caractérisées par une architecture complexe de fils interreliés selon trois directions indépendantes. Par exemple, les sociétés Safran et General Electric Aviation ont choisi des tissus 3D interlock de fibres de carbone comme renforts des aubes tournantes et du carter de soufflante du moteur *LEAP* [4].



Figure 1.1: Présentation des composants du moteur *LEAP* fabriqués à l'aide de tissus 3D interlock

Le moteur illustré à la figure 1.1 offre des performances inégalées qui sont entre autres attribuées à sa légèreté et sa capacité à contenir l'expulsion des aubes tournantes en cas d'explosion du rotor grâce à son carter de soufflante fabriqué avec un renfort textile 3D. Ces préformes 3D sont réalisées avec des métiers à tisser numériques qui peuvent changer la structure du tissu en continu.

Le GroupeCTT à St-Hyacinthe, en partenariat avec Texonic, a récemment développé un métier à tisser 3D de dernière génération pour équiper son laboratoire. Ce métier est opéré par un logiciel unique conçu par le GroupeCTT qui permet la création de structures textiles 3D et de contrôler leur métier à tisser. Par contre, le logiciel ne permet pas de modéliser

la forme finale réelle d'un tissu, l'épaisseur de ce tissu et la fraction volumique de ce renfort fibreux. Actuellement, peu d'études permettent de relier efficacement et facilement ces paramètres d'entrée et la géométrie réelle du tissu 3D. La géométrie d'un tissu 3D peut grandement varier en fonction des matériaux des fils (p. ex., carbone, verre), le titrage des fils (p. ex., 3000, 6000 et 12000 filaments) ou le type de structure. Cette géométrie réelle est critique pour concevoir des produits composites renforcés avec des tissus 3D qui ont des épaisseurs et taux de fibres connus en tout point.

1.2 Problématique des renforts 3D tissés

Avec l'augmentation de l'intérêt actuel des tissus 3D, les besoins de prédire les dimensions et performances mécaniques de ces tissus complexes sont primordiaux. Plusieurs méthodes de modélisation ont été développées pour tenter de corrélérer la géométrie des tissus 3D avec leurs performances et comportements mécaniques.

Généralement, les modèles actuels permettent de générer un modèle 3D du tissu prêt à être testé numériquement à l'aide d'un logiciel d'éléments finis. Toutefois, la modélisation d'une structure 3D réaliste demande généralement soit de connaître à l'avance toutes les dimensions géométriques du tissu ou demande de grandes ressources de calculs numériques. L'obtention des dimensions complètes d'un tissu 3D requiert une caractérisation avancée et coûteuse. De ce fait, cette approche implique que le tissu à modéliser doit être déjà fabriqué et entièrement analysé.

Du point de vue d'un fabricant de ces produits textiles, ces nombreuses étapes sont un frein direct à la promotion rapide des avantages de ces tissus. Le partenaire industriel devrait être en mesure de fournir rapidement à ses clients plusieurs modèles 3D de tissus spécifiquement conçus afin de leur permettre d'apprécier les dimensions et performances des renforts 3D. La majorité des modèles ne sont pas en mesure de reproduire directement et rapidement une géométrie réaliste des tissus 3D interlock. Ainsi, le développement d'une différente approche de modélisation doit être considéré pour subvenir aux besoins du partenaire. De plus, le GroupeCTT a aussi besoin de relier leur logiciel de fabrication *EasyJC* avec l'outil de modélisation développé. Les objectifs requis pour réaliser ce projet sont présentés à la section ci-dessous.

1.3 Objectif principal : Développement d'un outil de simulation pour la conception de préformes par tissage 3D

Afin de résoudre la problématique et de répondre aux besoins du partenaire, trois sous-objectifs doivent être effectués. Ceux-ci sont présentés ci-dessous.

1. Fabriquer et caractériser des tissus interlock 3D types
2. Développer un modèle géométrique des structures tissées 3D
3. Valider expérimentalement le modèle géométrique développé

1.4 Plan du mémoire

Le chapitre 2 de ce mémoire, soit la revue de la littérature, est divisé en deux sections. Premièrement, une revue de la définition et fabrication des tissus 3D est présentée. Deuxièmement, une revue des principales approches de modélisation est présentée. Ce chapitre va permettre renforcer les constats initiaux énoncés aux sections 1.1 et 1.2 sur les tissus 3D.

Le chapitre 3 permet de répondre au premier sous-objectif de ce projet. Tout d'abord, la description du fonctionnement d'un métier à tisser est présentée. Ensuite, la fabrication de tissus 3D types est présentée. Finalement, une caractérisation préliminaire a été effectuée sur les tissus fabriqués.

Le Chapitre 4 présente le second sous-objectif du projet, soit le développement d'une approche de modélisation. La présentation du modèle développé est divisée en cinq sections, soit la structure globale du modèle, les paramètres d'entrée, les définitions des sections et des trajectoires des fils et la génération du modèle 3D.

Le chapitre 5 permet de valider la précision du modèle, soit le dernier sous-objectif du projet. Premièrement, la fabrication de plaques composites renforcées de tissus 3D est présentée. Deuxièmement, les procédures de polissage des échantillons et de récupération des données sont détaillées. Troisièmement, une analyse dimensionnelle est présentée. Les tissus modélisés sont comparés à la géométrie réelle des tissus fabriqués à l'aide d'images prises sur les échantillons des plaques composites.

La conclusion présente une synthèse des travaux, résume les limitations du modèle développé et suggère des améliorations futures.

CHAPITRE 2 REVUE DES TEXTILES TISSÉS 3D ET LEUR MODÉLISATION

Un constat de la situation actuelle sur les tissus 3D interlock est présenté dans ce chapitre. Ce dernier est divisé en deux sections. La première section permet de mettre en contexte la définition d'un tissu 3D et de sa fabrication. La seconde présente les principales approches de modélisation.

2.1 Définitions des textiles tissés 3D

2.1.1 Définitions générales

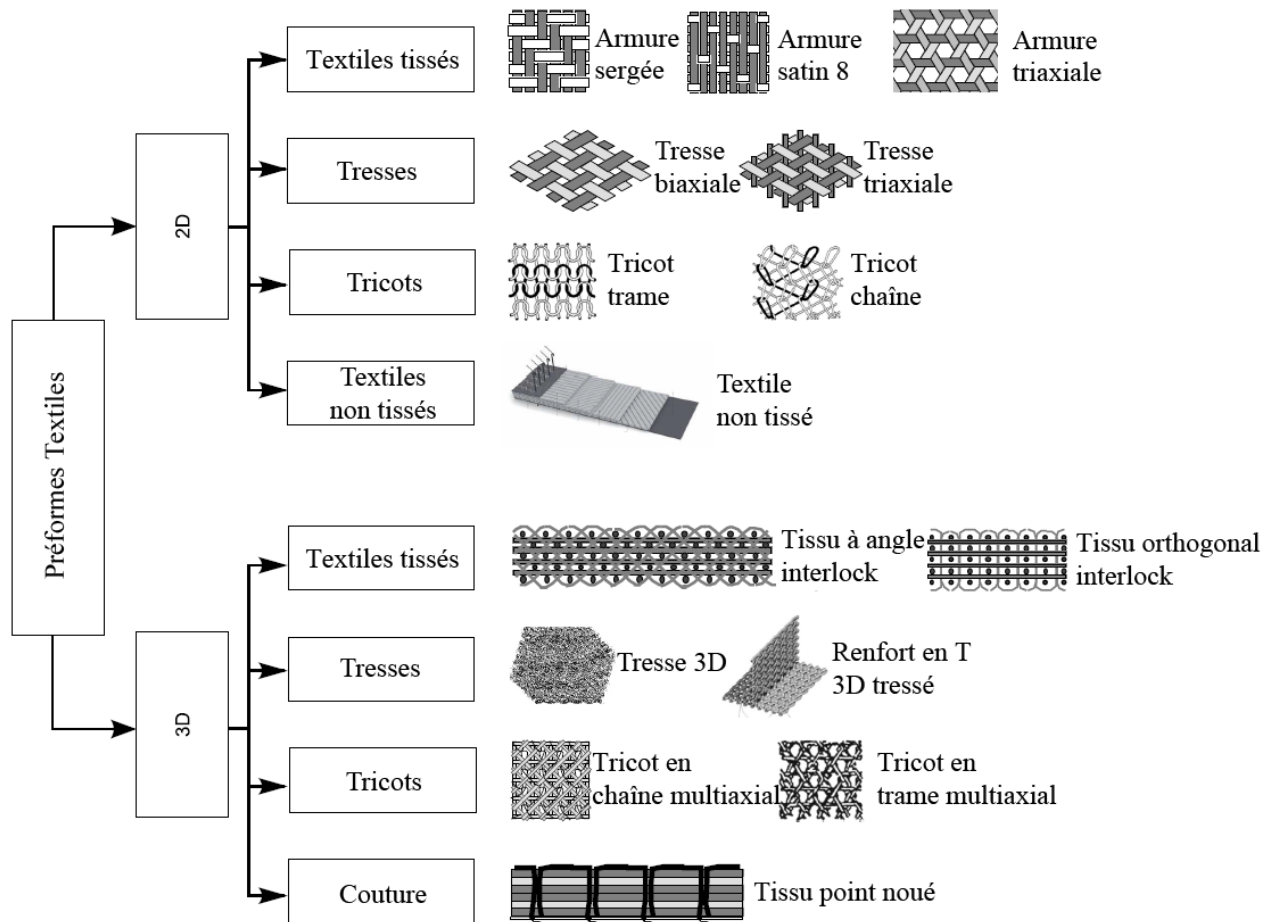


Figure 2.1: Présentation visuelle des principaux renforts textiles (adaptée de[1])

Il existe une très grande variété de renforts textiles [1, 5]. La figure 2.1 permet classer les principaux renforts textiles selon quatre principales catégories de tissus, soit les textiles tissés, les tresses, les tricots, et les textiles non tissé (2D) ou cousus (3D). Ce projet se concentre sur les textiles tissés 3D . Les différents types de fils que peuvent contenir les tissus 3D interlock [6] sont présentés à la figure 2.2.

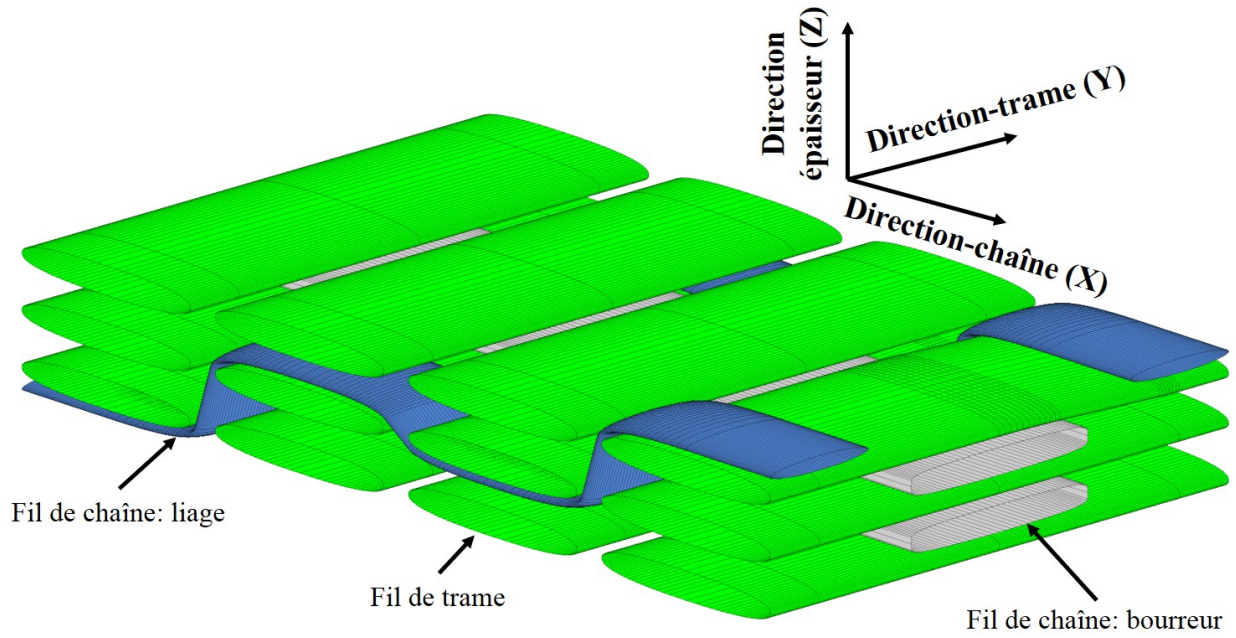


Figure 2.2: Présentation des trois types de fils des tissus 3D interlock

La figure 2.2 présente la définition générale des axes des tissus 3D, soit la direction-chaîne en **X**, la direction-trame en **Y** et la direction de l'épaisseur en **Z**. En ce qui concerne les types de fils de cet exemple, il est possible de constater qu'il existe deux différents fils de chaîne, soit le fil de liage en **bleu** et le fil bourreur en **gris**. La différenciation entre ces deux fils provient de leurs trajectoires. Un fil bourreur possède une trajectoire quasi linéaire entre deux couches de fils de trames (**vert**). Un fil de liage possède une trajectoire non linéaire ce qui lui permet de lier les couches du tissu ensemble. La proportion des fils de liage dans un tissu 3D interlock est généralement en dessous de 5% [2]. Ainsi, en l'absence de fils bourreurs dans un tissu, les fils ayant une trajectoire non linéaire sont simplement considérés comme des fils de chaîne. Finalement, la figure 2.2 permet de définir les conventions utilisées dans ce mémoire, soit les couleurs des fils et leurs directions.

Les trois principales séquences d'entrecroisement des fils de trames et de chaînes, soit l'armure associée à chacune des couches d'un tissu 3D, sont présentées à la figure 2.3.

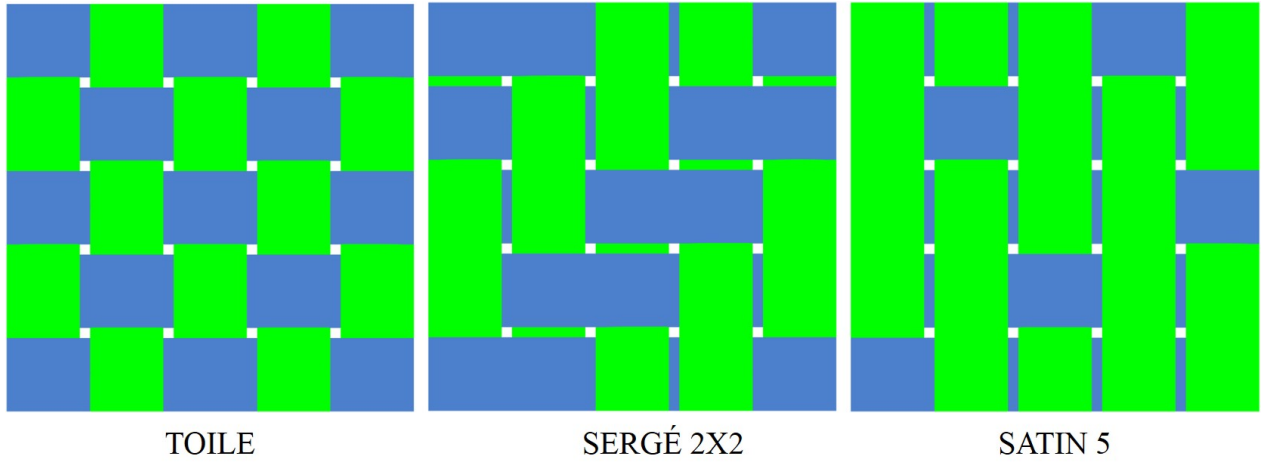


Figure 2.3: Présentation des trois exemples types d'armures couramment utilisées pour fabriquer des textiles tissés 2D et 3D

Les trois armures présentées à la figure 2.3 permettent de structurer les couches d'un tissu 2D et 3D selon différentes séquences de croisements des fils. L'armure de type *TOILE* possède un ratio de croisement de 1x1 pour tous ses fils, soit 1 fois au-dessus pour 1 fois en dessous. Similairement, l'armure *SERGÉ* possède un ratio de croisement de 2x2, soit 2 fois au-dessus pour 2 fois en dessous. Finalement, l'armure *Satin 5* possède quant à elle un ratio de 1 au-dessus pour 4 en dessous pour les fils de chaîne en bleu et 4 au-dessus pour 1 en dessous pour les fils de trame en vert. De plus, il existe d'autres configurations possibles des armures sergé et satin tels que des *SERGÉ* 2x1, 3x1 et *SATIN* 8 [7].

Afin de faciliter la description de la structure d'un tissu 3D interlock dans son épaisseur et d'éviter des confusions, Boussu *et al.* propose de standardiser la nomenclature des différentes variantes possibles des tissus 3D interlock [8]. Celui-ci officialise les quatre grandes classes d'un tissu 3D interlock, soit les tissus à angle couche à couche (ACC) ou à travers la profondeur (ATP) et les tissus orthogonaux couche à couche (OCC) ou à travers la profondeur (OTP).

Ces quatre classes sont présentées à la figure 2.4. La différence entre un tissu OCC et ACC réside dans la trajectoire du liage. Pour les tissus OCC, le fil de liage en bleu de la figure 2.4a doit lier un minimum de deux couches du tissu, soit deux colonnes de trames illustrées en

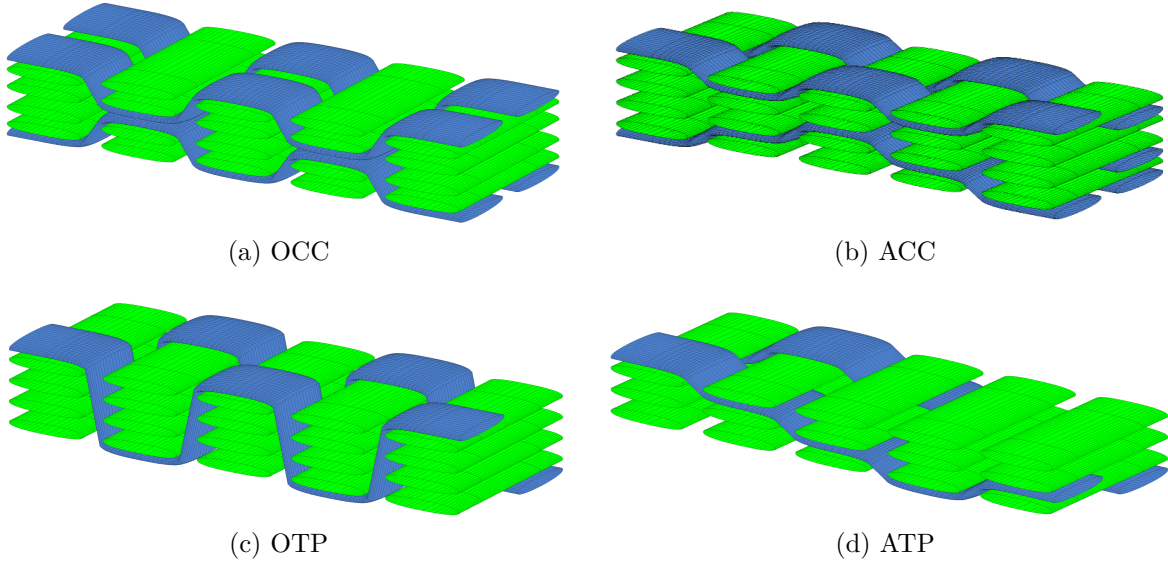


Figure 2.4: Présentation des quatre grandes classes des tissus 3D interlock

vert. Pour les tissus ACC, ceux-ci possèdent des fils de chaîne se déplaçant dans le tissu selon un ratio de décalage un pour un, soit une rangée de trame pour une colonne de trame tel qu'illustré à la figure 2.4b. Ensuite, pour les tissus OTP et ATP des figures 2.4c et 2.4d, les mêmes principes s'appliquent que pour les tissus couche à couche à l'exception que le liage parcourt toute la profondeur des tissus. Pour terminer, une présentation générale des tissus 3D a été effectuée. Davantage d'informations sur la définition de ces tissus à architecture complexe et illimitée seront présentées dans les prochains chapitres lorsque nécessaire.

2.1.2 Définition du métier à tisser 3D

Afin de guider la réalisation du premier objectif, une revue sur la méthode de fabrication des tissus 3D interlock est présentée. L'intérêt de développer un métier à tisser permettant de fabriquer des renforts composites à base de tissus 3D remonte à près d'un demi-siècle [9]. Toutefois, une accentuation de l'intérêt pour ces tissus a été observée vers la fin des années 80 [2]. À partir de ce moment, la popularité de cette méthode de fabrication s'est considérablement intensifiée. Diverses variations de métier à tisser sont présentées dans plusieurs livres et revues [7, 10–12].

Le fonctionnement d'un métier à tisser 3D possède dans la majorité des cas les mêmes étapes de fabrication qu'un métier à tisser 2D conventionnel. Les trois étapes générales sont illustrées à la figure 2.5. La première étape consiste à positionner les fils de chaînes en bleu au-dessus

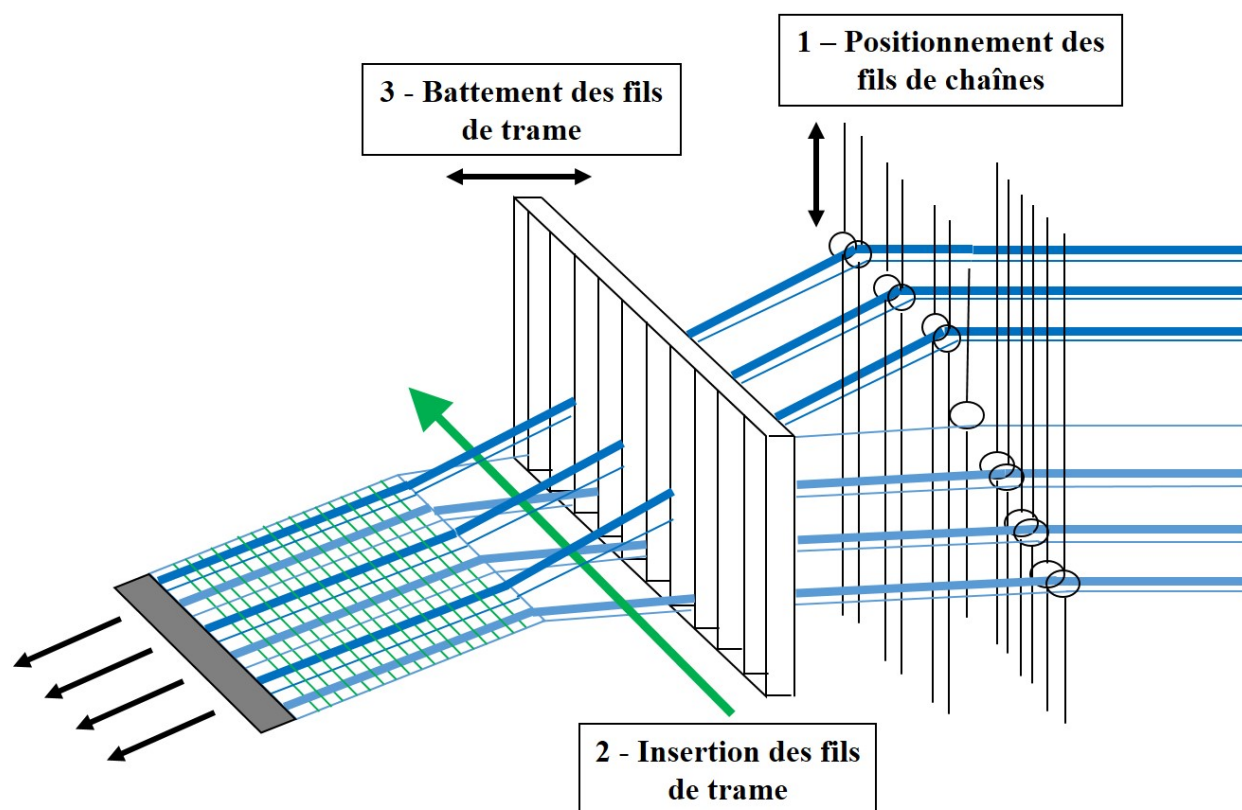


Figure 2.5: Présentation des trois étapes de fabrication d'un tissu 2D et 3D

ou en dessous de la zone d'insertion. La seconde étape est l'insertion du fil de trame en vert. Ensuite, la troisième étape est de venir battre la trame insérée sur le tissu. Ainsi, afin de fabriquer 3D, il suffit d'empiler les fils de trame sous forme de colonnes afin de former plusieurs couches dans l'épaisseur du tissu. Une couche d'un tissu est généralement formée de l'alternance d'un fil de trame et d'un fil de chaîne. Pour ce faire, le métier à tisser doit être en mesure de contenir un nombre très élevé de fils de chaînes. Finalement, le contrôle individuel du levage des fils de chaînes doit être d'autant plus complexe afin d'être en mesure de contrôler le levage de chacun de ces fils tel qu'illustré à la figure 2.5.

Suite à la présentation généralisée d'un métier à tisser, la majorité de ces machines sont spécifiquement adaptées pour fabriquer des tissus 3D ayant une application précise [13]. De ce fait, il est difficile d'établir un métier à tisser standard pour la fabrication de ce tissu à architecture complexe. Pour cette raison, la présentation des sous-systèmes et du fonctionnement du métier à tisser utilisé dans ce projet est nécessaire pour corrélérer le modèle à développer avec ce dernier. Cette présentation sera faite au chapitre 3.

2.2 Approches de modélisation

2.2.1 Introduction

Parallèlement au développement des métiers à tisser, les premiers modèles traitant des tissus 3D interlock ont émergé au milieu des années 90. L'intérêt principal de développer ces modèles est d'être en mesure de prédire la géométrie et les performances mécaniques des tissus 3D. Dans cette optique, des analyses du comportement en délamination, en fatigue, en compression, en tension et en flexion de ces tissus ont été effectuées [6, 14–16]. Ces travaux ont permis de créer un modèle en éléments finis des tissus 3D [17, 18]. L'objectif principal de ce modèle est de prévoir les propriétés mécaniques des tissus. La modélisation des tissus de ce modèle est basée sur une caractérisation rigoureuse de la géométrie des tissus. Suite à ces travaux, plusieurs modèles ont émergé. Trois principaux modèles traitant des tissus 3D interlock sont présentés. La présentation de ces trois approches permet de différencier les principales techniques de modélisation, soit une modélisation géométrique, mécanique et hybride. Suite à la présentation de ces modèles, un résumé de plusieurs approches est présenté.

2.2.2 Géométrie : TexGen

Les développements initiaux de cette approche géométrique ont été effectués par Long et Robitaille [19–21]. Ce modèle initial a été développé avec l'objectif de modéliser toute possibilité de définitions géométriques, peu importe le type de renforts textiles choisis. De cette optique, les itérations futures de ce modèle ont conservé cette même ligne directrice. Les travaux de doctorat de Sherburn ont permis de donner naissance à la troisième version de TexGen [22–24]. Cette approche géométrique universelle requiert de connaître toutes les dimensions du tissu à modéliser afin de générer une structure textile 3D réaliste.

La trajectoire des fils est définie à l'aide d'une interpolation des points centraux de chacun des fils. Cette interpolation de points peut être effectuée à l'aide d'une fonction cubique de Bézier ou une fonction cubique naturelle ou périodique. Pour ce qui est de la définition de la section des fils, celle-ci peut être définie selon cinq différentes formes, soit une ellipse, une power-ellipse [25], une forme lenticulaire, une forme hybride ou un polygone. Cette grande flexibilité au niveau des choix de sections permet d'offrir des solutions simples et efficaces pour modéliser des formes de sections complexes. De plus, une interpolation linéaire ou cubique permet de relier les variations de sections d'un fil dans sa longueur. Des stratégies d'identifications des intersections entre les fils ont été développées dans les travaux de Sherburn [22]. Toutefois, ces stratégies ne parviennent pas à éliminer toutes les interpénétrations

possibles entre les fils. Finalement, une option de raffinement a été ajoutée au modèle afin de permettre d’atteindre une épaisseur de tissu cible [26].

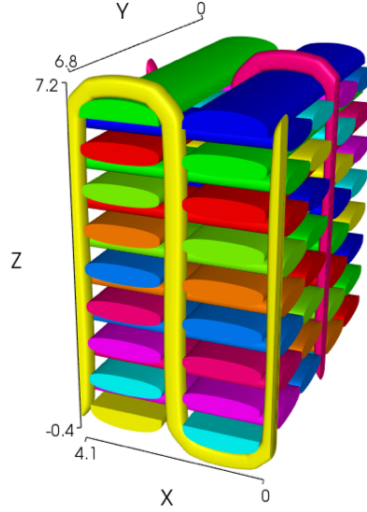


Figure 2.6: Présentation d’un tissu OTP modélisé avec le logiciel Texgen 3.8.2

Pour terminer, une revue de l’utilisation de la version 3.8.2 de Texgen [27] est présentée à l’annexe A. Un tissu OTP modélisé avec cette version du logiciel est présenté à la figure 2.6. Cette étude a permis de faire ressortir les forces et les faiblesses de modélisation des tissus 3D de cette approche. En résumé, TexGen permet de modéliser des structures 3D interlock avec beaucoup de flexibilité, mais requiert une caractérisation géométrique complète de chaque tissu à modéliser afin de générer un modèle réaliste.

2.2.3 Mécanique : Éléments numériques

Cette seconde approche présente un modèle mécanique basé sur le concept fondamental de chaînes élémentaires. Le développement de cette approche permet de simuler le processus de fabrication et la mésostructure d’un tissu 3D. Cette approche élémentaire est constituée d’un assemblage successif de nœuds et de tiges élémentaires non déformables [28]. Cet assemblage de nœuds et de tiges, soit une chaîne d’éléments numériques, permet de simuler le comportement mécaniques des fibres d’un fil.

Ensuite, un concept critique de contact entre les chaînes a été développé [29]. En fait, lorsqu’un contact a lieu entre deux nœuds, deux types d’interactions peuvent avoir lieu, soit un collage ou un glissement de ces deux éléments. Un glissement entre les deux éléments survient lorsque l’inégalité suivante n’est plus respectée : $\mu * |\vec{F}_n| > |\vec{F}_s|$ où μ est le coefficient

de friction, \vec{F}_n est la force de compression et \vec{F}_s est la force de cisaillement entre les deux éléments.

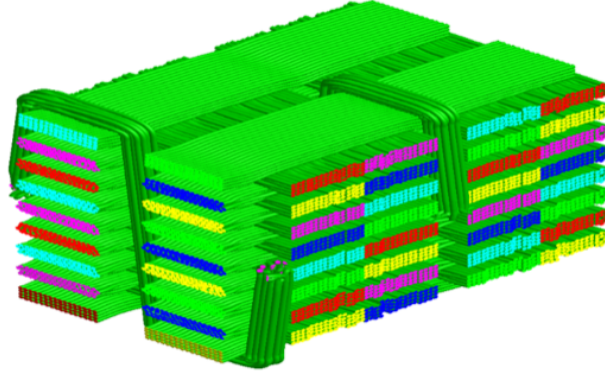


Figure 2.7: Présentation d'un tissu OTP partiellement relaxé à l'aide du logiciel de modélisation mécanique DFMA (version 0.5.1)

Des développements supplémentaires ont été effectués afin d'améliorer la précision et l'efficacité de ce modèle. Suite au développement d'une relaxation statique [30], une relaxation dynamique [31–33] du tissu et du processus de fabrication a été implémenté au modèle. En général, la relaxation d'un tissu permet de tendre vers un équilibre de forces de contact de toutes les fibres modélisées. Cette technique nécessite de considérer un nombre immense de contacts entre les fibres et donc de très grandes ressources informatiques. Une relaxation partielle d'un tissu de type OTP est présentée à la figure 2.7. La revue à l'annexe A traite aussi du logiciel de modélisation DFMA [34] utilisant cette approche. Cette revue a montré que cette technique de relaxation est complexe. Celle-ci procède par itérations dans lesquelles plusieurs paramètres de relaxation et modélisation doivent être ajustés. L'ajustement de ces paramètres demande un certain niveau d'expertise chez l'utilisateur. De plus, les ressources informatiques requises de ce logiciel sont très élevées.

2.2.4 Hybride : Wisetex

Cette troisième approche peut être considérée comme étant une approche hybride puisqu'elle contient à la fois des principes mécaniques et géométriques. Plus précisément, l'architecture élémentaire du tissu est modélisée à l'aide de principes géométriques et la représentation réaliste du tissu nécessite d'implémenter des propriétés mécaniques des fils. Plusieurs équations analytiques ont été implantées dans ce modèle afin de générer une structure raffinée d'un tissu 3D. Les divers travaux de Lomov traitent sur l'importance d'intégrer des comportements physiques à l'intérieur d'un modèle géométrique [35–37]. Ainsi, l'analyse interne des textiles

est au cœur du développement de son modèle [38].

Les principaux paramètres d'entrée requis sont le code de l'architecture du tissu, la forme elliptique de la section des fils, l'espacement entre les fils, la densité linéaire des fils, les coefficients de friction entre les fils et le comportement mécanique en flexion et compression des fils. Les formes des sections des fils de ce modèle sont peu complexes, ce qui permet de faciliter l'intégration de principes de la mécanique des fils à ce modèle. Une fois tous ces paramètres définis, l'ondulation reliée aux interactions des fils de trames et de chaînes et les variations des sections des fils sont déterminées selon des principes mécaniques d'interactions élémentaires [35, 39]. De plus, divers ajouts ont été implémentés au logiciel tel que la capacité de décaler les fils de trame un par rapport à l'autre [40].

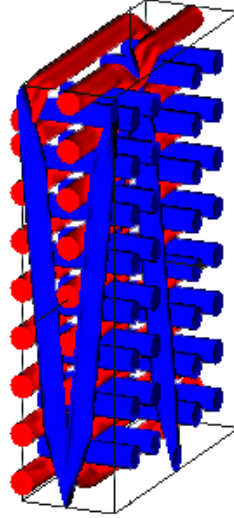


Figure 2.8: Présentation d'un tissu OTP avec ondulation de ses fils de trames à l'aide du logiciel Wisetex 3.2

Finalement, cette approche permet de générer rapidement un modèle 3D tout en prenant en compte des principes mécaniques des fils. La définition des sections des fils est toutefois limitée aux formes d'ellipses, lenticulaires ou rectangulaires [39]. Une revue du logiciel est aussi présentée pour ce modèle à l'annexe A. La version d'essai de Wisetex 3.2 [41] a été utilisée. Le tissu OTP présenté à la figure 2.8 a été modélisé à l'aide de cette version. La revue de cette approche a permis de conclure que la maîtrise complète du logiciel est relativement complexe puisqu'elle requiert des connaissances rigoureuses vis-à-vis l'utilisateur et que la caractérisation mécanique des fils demande de réaliser plusieurs tests expérimentaux.

2.2.5 Résumé des principales approches de modélisation

Tableau 2.1: Principales approches de modélisation des textiles tissés

Nom de l'approche	Auteur(s)	Type d'approche		Fondement de l'approche
		Géométrique	Mécanique	
Texgen	Long <i>et al.</i>	x		Modélisation géométrique universelle offrant plusieurs options de modélisation
Paramétrique	Boisse <i>et al.</i>	x		Modélisation géométrique sans interpénétration basée sur 3 à 7 paramètres de mesure des tissus
Analytique	Isart <i>et al.</i>	x		Modélisation d'un tissu OTP basée sur une caractérisation visuelle complète du tissu à modélisé
Binaire	Cox <i>et al.</i>		x	Modèle en éléments finis définissant les fils à l'aide d'élément linéaire à deux nœuds
Éléments numériques	Wang <i>et al.</i>		x	Fibres des fils représentés à l'aide de nœuds (sans-friction) et de tiges non déformables
Non linéaire	Durville		x	Modèle en éléments finis basé sur une définition de poutre à cinématique enrichie
Cinématique	Hallet <i>et al.</i>		x	Modélisation des fibres à l'aide d'éléments poutres dans le logiciel d'éléments finis LS-Dyna
Particule	Samadi <i>et al.</i>		x	Modélisation des fibres d'un fil à l'aide d'une série de sphères distinctes
Wisetex	Lomov <i>et al.</i>	x	x	Modélisation géométrique basée sur des principes mécaniques des fils

Pour terminer cette section sur la modélisation des tissus 3D, un résumé des principales approches de modélisation existantes est présenté au tableau 2.1. D'une part, les trois approches géométriques présentées, soit celles de Long, Boisse [42, 43] et Isart [44, 45], ont toutes des objectifs différents. Pour Texgen, celle-ci vise à offrir une solution universelle facile d'utilisation. Pour l'approche paramétrique, celle-ci permet de modéliser rapidement une structure géométrique sans interpénétration des fils. Puis l'approche analytique permet de modéliser un tissu 3D orthogonal avec un fort degré de réalisme. Toutefois, ces trois approches requièrent des caractérisations détaillées des tissus à modéliser afin de générer un modèle 3D réaliste.

D'un autre côté, les approches mécaniques permettent généralement d'éliminer le requis de caractérisation géométrique des tissus puisque la forme des fils sont un résultat et non pas une condition initiale. Les modèles mécaniques présentés ont tous des approches similaires. D'ailleurs, l'approche cinématique [46–50] est basée sur l'approche d'éléments numériques, mais elle diffère de celle-ci au niveau de sa définition de contact qui est effectuée avec le

logiciel d'éléments finis LS-Dyna.

Pour ce qui est de l'approche non linéaire [51–58], celle-ci se base une définition de poutre à cinématique enrichie. Chaque élément d'une poutre possède trois vecteurs, dont deux qui permettent de prendre en compte les déformations des sections des fibres modélisées. L'approche basée sur des particules [59], soit des sphères, élimine l'élément poutre de sa définition. Cette différente approche mécanique permet de simuler avec une meilleure précision des grands déplacements des fibres. Pour terminer, malgré le grand potentiel de ces approches mécaniques, celles-ci requièrent des grandes ressources informatiques afin de modéliser un tissu 3D similaire à la réalité.

Finalement, l'approche hybride de Wisetex permet de modéliser une structure 3D géométrique à l'aide de principes mécaniques des fils. Cette dernière approche est toutefois limitée par la forme simplifiée des sections des fils et les requis de caractérisation mécaniques des fils.

En conclusion, la présentation de ces différentes approches de modélisation a permis de déterminer que le développement d'une approche géométrique semble être la plus propice à répondre adéquatement aux besoins du partenaire de prédire rapidement et facilement les dimensions de leurs tissus 3D à la sortie du métier à tisser. Le modèle développé devra cependant tenter de limiter drastiquement les besoins de caractérisation qui sont habituellement requis pour ce type d'approche.

CHAPITRE 3 FABRICATION ET CARACTÉRISATION PRÉLIMINAIRE DE TISSUS INTERLOCK 3D À L'AIDE D'UN MÉTIER À TISSER NUMÉRIQUE

3.1 Introduction

La fabrication de tissus 3D interlock nécessite une forte expérience dans le domaine textile. Le métier à tisser numérique utilisé dans ce projet est celui du partenaire industriel du GroupeCTT. L'analyse de cet équipement hautement spécialisé est importante afin de bien comprendre l'influence de celui-ci sur la géométrie du tissu fabriqué.

De ce fait, ce premier chapitre est divisé en deux parties. D'une part, la présentation du fonctionnement de chaque sous-système du métier à tisser numérique est effectuée. Plus précisément, l'observation des différentes interactions possibles entre les fils et les composants du métier lors de la fabrication d'un tissu interlock 3D va permettre d'identifier des paramètres clés de fabrication influençant la géométrie du tissu.

D'une autre part, la fabrication de tissus 3D interlock types va permettre d'effectuer une caractérisation préliminaire de leur géométrie. L'analyse de cette caractérisation va permettre de quantifier l'influence des paramètres de fabrication sur les dimensions des fils dans les tissus. Finalement, ces deux premières étapes vont permettre de guider la direction à prendre quant à la conception du modèle géométrique présenté au chapitre 4.

3.2 Fonctionnement du métier à tisser

Un point de vue global des composants du métier à tisser est présenté à la figure 3.1. Cette figure permet de visualiser le positionnement relatif de chacun des composants du métier, soit, le cantre {1}, le peigne arrière {2}, le système de levage des fils {3}, le peigne avant {4} et la table de traction {5}. Ces éléments sont présentés dans les sous-sections suivantes.

3.2.1 Composant d'un métier à tisser numérique

Cantre

Le cantre est le premier système dans la ligne de production d'un tissu 3D. Le rôle du cantre est de contenir les fils de chaîne dans le tissu, de contrôler leur tension tout en minimisant

leur dommage. Il peut contenir de façon très organisée des centaines ou même des milliers de fils enroulés sur des bobines. Un nombre élevé de fils de chaîne est requis pour fabriquer des tissus 3D épais.

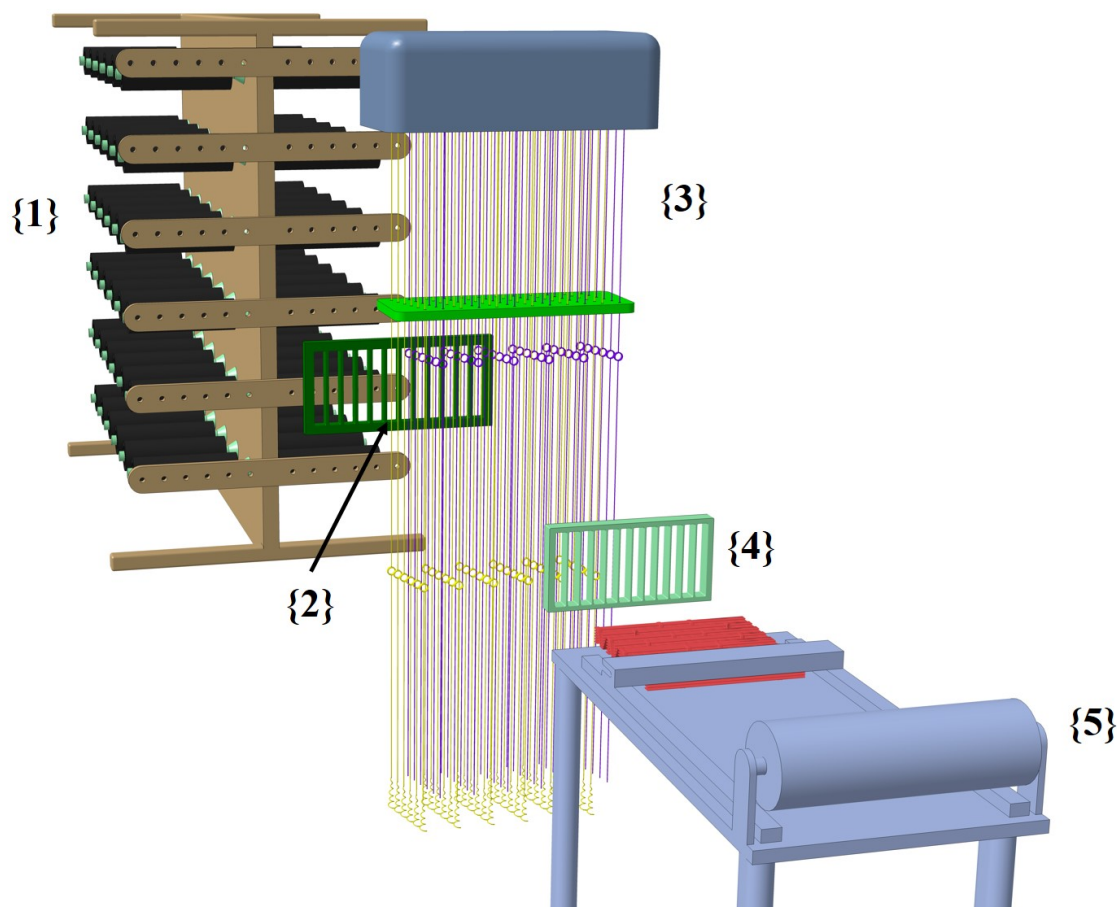


Figure 3.1: Représentation globale des composants principaux d'un métier à tisser 3D

À la figure 3.2, on peut remarquer un exemple de cantre simplifié et réduit de celui utilisé. Les bobines, en noir, sont positionnées sur des axes leur permettant de tourner librement ou avec assistance électrique autour de ceux-ci. Plusieurs bobines peuvent être positionnées sur un même axe afin de maximiser la densité de bobines à inclure dans un cantre.

Ensuite, un système de contrôle de la tension des fils de chaîne est généralement installé au niveau de chaque axe de rotation des bobines. L'implémentation d'un système électrique est une approche qui permet de régler avec précision la tension des fils de chaîne, mais nécessite des coûts très élevés. Le contrôle de la tension au niveau de l'axe permet d'éviter de la contrôler directement sur les fils, ce qui risque de les endommager.

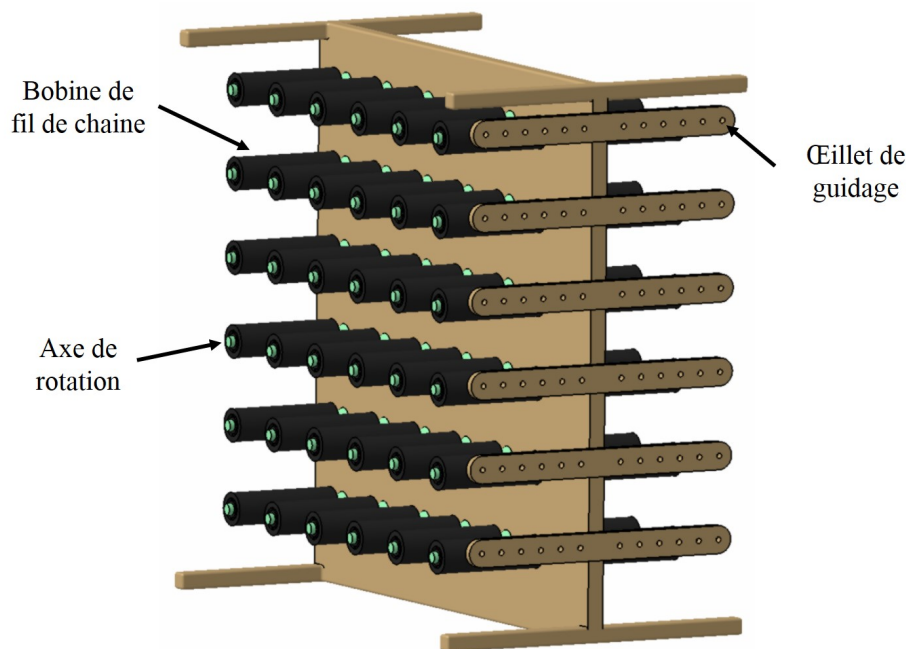


Figure 3.2: Exemple simplifié et réduit d'un cantre contenant 72 bobines de fils de chaîne

Finalement, un métier à tisser contient généralement de 1 à 3 cantres. Le nombre de cantres utilisés dépend de la complexité de leurs structures et de leurs systèmes. Le positionnement de ceux-ci est très important afin de minimiser les changements de trajectoire brusques des fils de chaîne lors de leur sortie du cantre afin de minimiser leur risque de rupture dans certains cas sévères. Les fils situés aux extrémités du cantre frottent davantage sur les composants du métier que ceux situés à l'intérieur. Un contrôle de tension spécifique à chaque bobine permet de limiter grandement ces variations. Ainsi, le contrôle de la tension des fils de chaînes semble jouer un rôle important afin d'obtenir une géométrie uniforme et sans défaut du tissu.

Harnais, Arcades & Jacquard

Le second sous-système regroupe tous les composants nécessaires pour positionner individuellement les fils de chaîne en position haute ou basse. Les trois composants principaux de ce système sont affichés à la figure 3.3, soit le contrôleur numérique, communément appelé une tête Jacquard, les fils d'arcades et le harnais. La tête Jacquard numérique représente le cœur du système de levage des fils. En fait, celle-ci est composée de plusieurs milliers de petits servomoteurs électriques. Le contrôle de ceux-ci est effectué à l'aide du logiciel de fabrication des tissus tel que celui du GroupeCTT, EasyJC. Chaque moteur utilisé est relié avec l'extrémité un fil d'arcade qui y est enroulé. Ces fils sont positionnés à la verticale et

leur tension est assurée par un ressort situé à leur seconde extrémité.

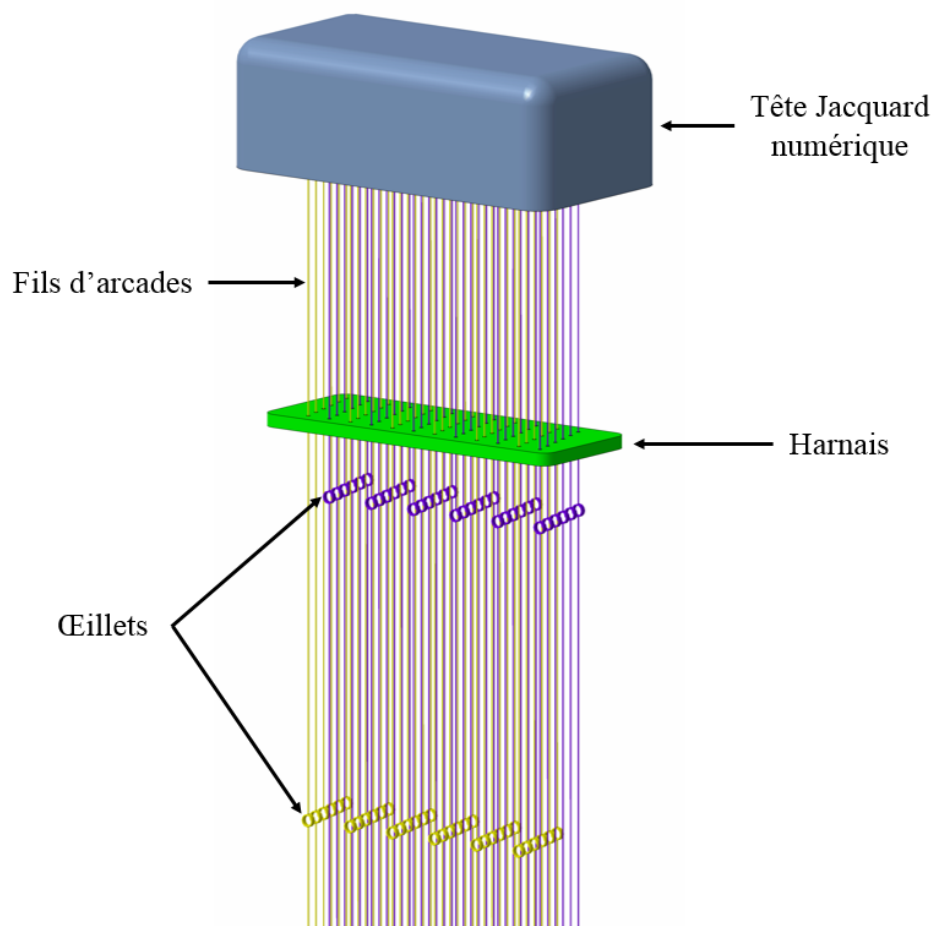


Figure 3.3: Présentation du sous-système permettant de déplacer verticalement les fils de chaîne

Au milieu de ces arcades, on y retrouve un œillet, tel qu'illustré à la figure 3.3, permettant le déplacement vertical des fils de chaîne. Finalement, le harnais a comme fonction de positionner de façon très précise chacune des arcades. Le design du harnais est choisi par le fabricant en fonction de la capacité du cantre et des dimensions en épaisseur et largeur des tissus à fabriquer. La figure 3.3 permet de bien visualiser le positionnement des arcades sous forme de colonnes décalées. Ce décalage permet d'éviter le frottement entre les fils et tout risque que ceux-ci s'entremêlent ensemble.

Pour terminer, le système jacquard est le principal responsable des variations brusques de la tension dans les fils de chaîne. La configuration des paramètres de levage des fils tels que l'amplitude et la vitesse est essentielle au bon fonctionnement du métier.

Peigne

Le peigne d'un métier à tisser permet de trier par colonnes les fils de chaînes. Il est possible de retrouver un peigne à l'avant et à l'arrière du système Jacquard tel qu'illustré à la figure 3.4.

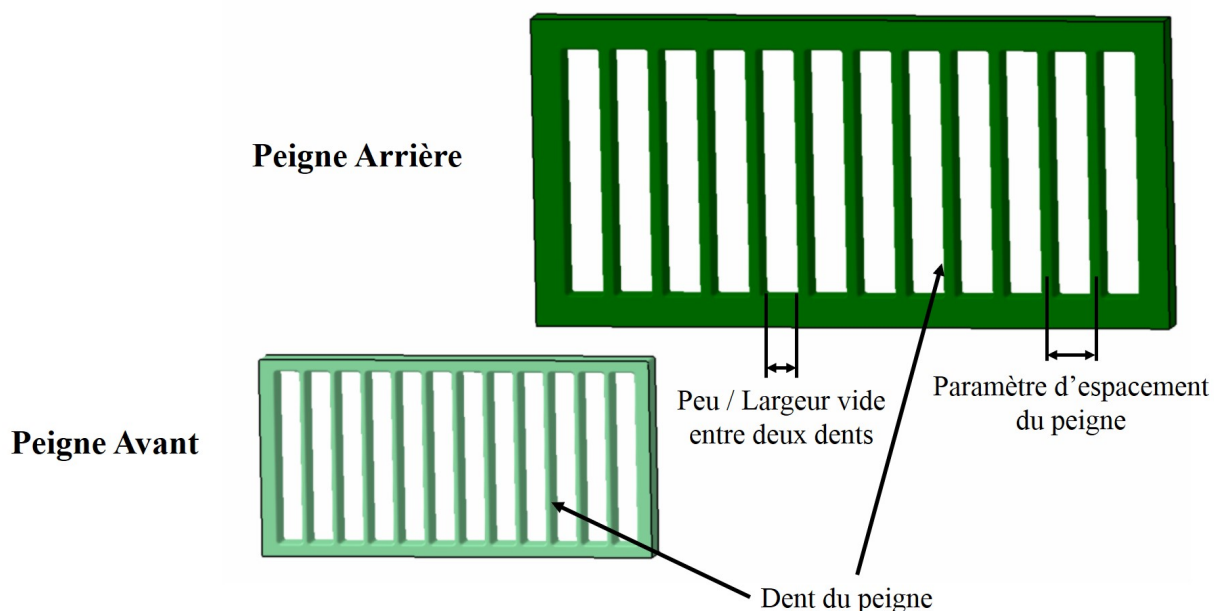


Figure 3.4: Présentation des dimensions critiques et la différence de grandeur des peignes avant et arrière

Un peigne est constitué de peu et de dents. Un peu représente l'espacement vide entre deux dents. L'addition de la largeur d'une dent et de l'espacement du peu est considérée comme étant l'espacement du peigne. Cet espacement semble être directement relié à la largeur d'une colonne de fils de chaîne du tissu à fabriquer. Premièrement, le peigne arrière permet de trier grossièrement les fils arrivant du cantre. Contrairement au peigne situé à l'avant du jacquard, le peigne arrière est fixe et n'est pas obligatoire pour assurer le fonctionnement du métier à tisser. Ce dernier est généralement utilisé dans le but de limiter le frottement entre les fils sortant du cantre.

Deuxièmement, le peigne avant permet d'une part de contrôler la densité du tissu à fabriquer. D'autre part, il possède une seconde fonction critique dans la fabrication d'un tissu puisqu'il est responsable de rabattre les fils de trame après leur insertion.

Système d'insertion des trames

En ce qui a trait aux fils de trame d'un tissu 3D, ceux-ci sont insérés dans la direction perpendiculaire de l'orientation des fils de chaînes, soit selon la direction Y du tissu. Il existe deux principales méthodes d'insertions des fils de trame.

D'une part, la première méthode utilise une navette qui transporte une bobine de fil en effectuant des allers-retours dans la largeur du tissu. La seconde méthode d'insertion des fils de trame est effectuée à l'aide de lances permettant de transporter une trame à la fois. Dans l'étude actuelle, seule l'utilisation d'un système de lance est considérée puisque la méthode utilisant une navette engendre une compaction latérale du tissu non désirable.

L'action d'insertion d'un fil de trame est effectuée à la suite du levage des fils de chaîne. Cette ouverture des fils de chaîne se nomme la foule. L'ouverture de la foule permet d'insérer un fil de trame dans un emplacement spécifique du tissu. Il est important que tous les fils de chaînes soient en position levés ou abaissés afin d'obtenir une ouverture libre de tout fils de chaîne. Un fil de chaîne qui n'a pas été levé ou abaissé risque de se faire couper au passage de la lance. Ceci créera un défaut dans le tissu.

Suite à l'insertion d'un fil de trame, le peigne du métier vient rabattre ces derniers sur la portion du tissu déjà formée. En général, la tension dans les fils de trame insérés a peu d'influence sur la géométrie du tissu puisque leurs extrémités sont libres. Ceux-ci ont tendance à suivre un parcours dicté par les fils de chaîne sous tension.

Système de traction

Finalement, le système de traction qui est illustré de façon simplifiée à la figure 3.5 est le dernier composant d'un métier à tisser. Celui-ci peut prendre forme d'une table munie d'un système de traction numérique et d'un rouleau rotatif. La traction linéaire est utilisée lorsque la longueur du tissu à fabriquer est plus petite que la table. Pour de grandes distances, l'utilisation d'un rouleau de traction est préférable. L'avance d'un tissu est définie comme étant le pas de distance effectué avec l'élément de traction. Celui-ci peut avoir lieu à chacune des insertions de trame, à chaque fin de colonnes de trames ou définie spécifiquement par l'utilisateur. Ainsi, l'avance est le principal paramètre ayant un impact direct sur la densité du tissu dans la direction Y.

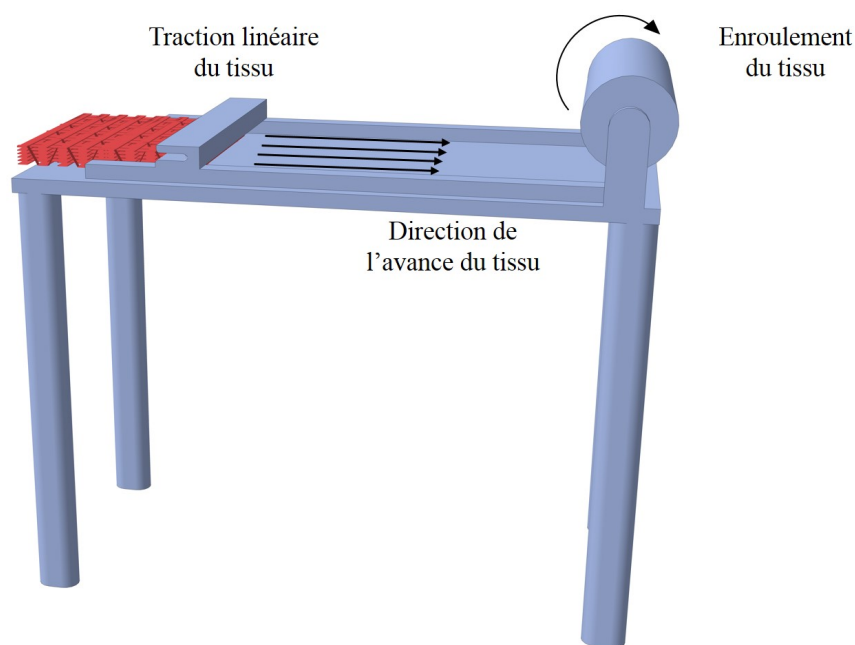


Figure 3.5: Représentation simplifiée des mécanismes de traction des tissus 3D

3.2.2 Passage des fils de chaîne

Suite à la description de chacun des composants du métier à tisser numérique utilisé, l'analyse de la trajectoire complète des fils de chaînes est présentée. Cette analyse visuelle permet de relier le fonctionnement de chacun des sous-systèmes du métier.

La figure 3.6 suivante représente le cheminement de deux fils de chaîne illustrés en rouge dans le métier à tisser en cinq étapes. La première {1} se nomme l'entartrage. Celle-ci consiste à ordonner la sortie des fils du cantre via des oeillets en porcelaine. L'organisation de la sortie des fils du cantre permet d'éviter que ceux-ci frottent ensemble en convergeant vers le peigne arrière.

La seconde étape {2} consiste à passer dans le peigne arrière. Celui-ci a pour fonction d'organiser sous forme de colonnes les fils de chaînes.

La troisième étape {3} se nomme l'empotage. Cette étape consiste à faire passer individuellement chacun des fils de chaîne dans les oeillets des arcades. Les fils d'arcade reliés à ces oeillets sont positionnés à l'aide du harnais.

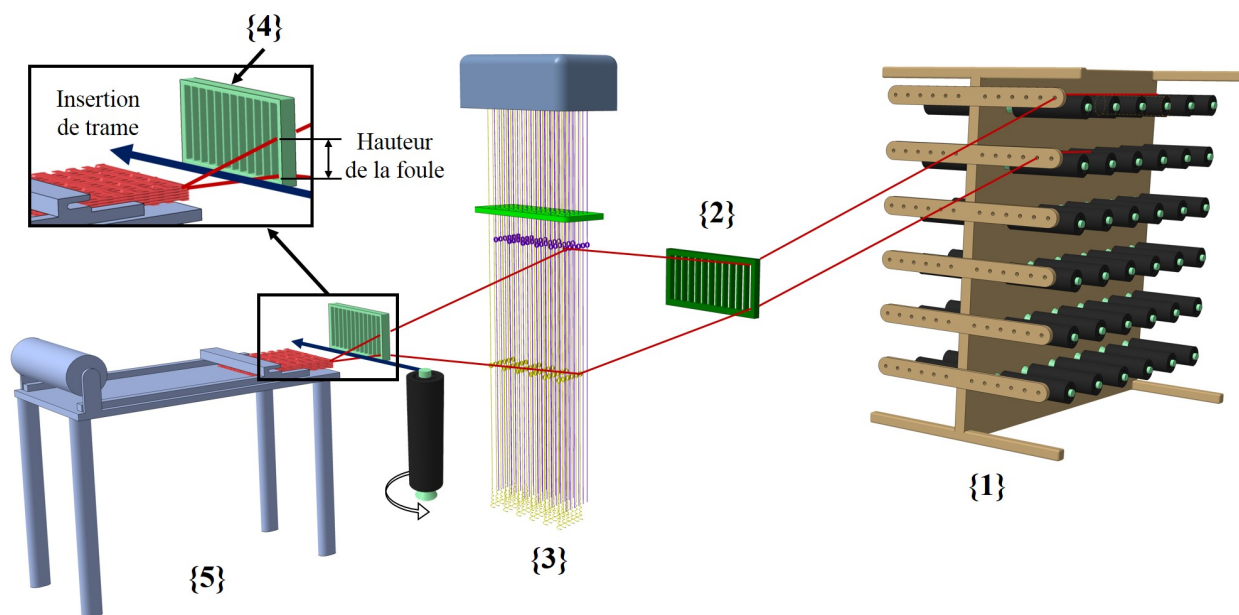


Figure 3.6: Représentation du passage de deux fils de chaîne en rouge dans tous les composants principaux d'un métier à tisser 3D

La quatrième étape {4} consiste à réorganiser les fils par colonnes dans le peigne avant. L'organisation des fils passant dans ce peigne a des répercussions directes sur la géométrie du tissu fabriqué.

La dernière étape {5} est de fixer les fils à un mécanisme de traction permettant de contrôler l'avance des fils de façon très précise. La trajectoire simplifiée de deux fils de chaîne à la figure 3.6 permet de constater les multiples interactions successives des fils de chaînes avec chaque sous-système. Les nombreux points de contact de cette trajectoire sont susceptibles de créer des zones de frottements risquant d'endommager les fils.

3.2.3 Paramètres critiques

Grâce à la description des systèmes d'un métier à tisser et l'analyse visuelle du passage des fils de chaînes, il a été possible d'identifier divers paramètres critiques du métier. La résistance à la rotation des bobines, l'efficacité du système de tension, les distances entre les divers composants, l'utilisation d'un peigne arrière, la hauteur de déplacement des oeillets, les dimensions du peigne avant et les variations de traction de la table semblent être tous des éléments ayant des influences différentes sur la géométrie finale des fils dans un tissu 3D interlock.

Parmi tous ces paramètres, seuls l'espacement du peigne avant et l'avance du tissu semblent avoir des impacts directs et mesurables sur la géométrie finale du tissu. Ceux-ci peuvent être considérés comme des paramètres critiques. Les paramètres restants permettent quant à eux de contrôler davantage la qualité et l'uniformité du produit que de dicter sa géométrie. D'ailleurs, le raffinement de ceux-ci permet de minimiser le risque de rupture des fils de chaînes. Le bris d'un fil de chaîne a des répercussions très néfastes sur la productivité de ce procédé. C'est pourquoi ces paramètres non critiques ne doivent pas être négligés.

3.3 Production des tissus

Suite à la présentation du fonctionnement du métier à tiser et du parcours des fils de chaîne, la fabrication d'un tissu 3D est présentée.

3.3.1 Préparation du métier

Tout d'abord, une période de tests a été effectuée afin de se familiariser avec les fonctions du métier et de l'optimisation des paramètres pour la fabrication d'un tissu 3D. Un résumé de toutes les étapes requises avant le début de la fabrication est présenté dans la liste suivante.

1. Design de l'architecture du tissu dans EasyJC
2. Exportation de l'architecture créée vers le métier
3. Passage des fils de chaînes dans les divers composants du métier
4. Ajustement des paramètres du métier
 - (a) Nombre d'insertion de trames par minutes
 - (b) Optimisation de l'ouverture de la foule
 - (c) Spécification des paramètres d'avance
 - (d) Sélection d'un peigne avant aux dimensions adéquates
 - (e) Réglage de la tension des fils de chaîne et de trame

3.3.2 Tissage d'un tissu 3D

La fabrication d'un tissu ACC avec une armure de type sergé 2-2 de 12 couches a été effectuée. En générale, plus la structure du tissu contient un nombre élevé de couches, plus la fabrication de ceux-ci est complexe à maîtriser. En d'autres mots, plus l'épaisseur du tissu est grande, plus les ajustements de synchronisme entre les composants du métier doivent être ajustés finement afin de pouvoir exécuter cette grande plage de position des fils de trame.

3.3.3 Découpe des tissus

Une fois la fabrication du tissu terminée, celui-ci est retiré de la table de traction et il est placé sur une table de découpe. Le tissu est ensuite positionné en dessous d'une pellicule en plastique afin de tenir fermement en place ce dernier avec l'assistance de vide. Puis, la découpe est effectuée avec une lame ultrasonique contrôlée par un robot. Cette approche de découpe permet d'effectuer des coupes nettes et précises des tissus 3D.

3.4 Analyse de l'influence des paramètres

La dernière section de ce chapitre va permettre de quantifier la relation entre deux paramètres critiques précédemment identifiés et la géométrie des tissus. Ces deux paramètres sont l'espacement du peigne et l'avance du tissu.

3.4.1 Caractérisation préliminaire dimensionnelle des tissus

Tableau 3.1: Propriétés des tissus types sélectionnés permettant de quantifier l'influence des paramètres de fabrication ciblés

Nom du tissu	Nombre de couches	Espacement du peigne (mm)	Longueur d'avance (mm)	Nombre de filaments par fil (K)		
				chaîne	Trame	Liage
NCS-1	11	3,175	2,352	12	12	3
NCS-2	11	3,175	2,856	12	12	3
NCS-3	17	3,175	2,856	12	12	3
SERGÉ-1	5	3,175	3,235	12	12	N/A
SERGÉ-2	5	3,175	3,135	12	12	N/A
SERGÉ-3	12	2,5	2,5	12	12	N/A

Afin d'évaluer l'influence des paramètres de fabrications, six tissus types ayant été fabriqués avec différentes densités ont été sélectionnés. Ceux-ci ont été séparés en deux grandes familles regroupant les principales variations des tissus interlock 3D. La première famille, soit un tissu OTP, possède une structure sans ondulation, plus couramment connu sous l'acronyme NCS découlant des mots anglais *Non-crimp Structures*. La seconde famille de tissus est une structure de type ACC. Chacune des couches est constituée d'une armure de type sergé 2-2. Les propriétés des tissus sont affichées au tableau 3.1.

Les deux types de fibres de carbone utilisés sont la Toho Tenax HTS40 F13 12K pour les fils de chaîne et trame et la Toho Tenax HTS40 E13 3K pour les fils de liage présents dans les tissus NCS.

Il est à noter qu'au tableau 3.1, le nombre de couches des tissus est calculé différemment pour les tissus NCS et SERGÉ. Pour les NCS, c'est l'addition des fils de chaîne et de trame dans la direction de l'épaisseur Z du tissu excluant les fils de liages qui permet de calculer le nombre de couches. Pour les de types SERGÉ, il suffit de comptabiliser le nombre de paires chaîne/trame dans la direction de l'épaisseur. Les tissus NCS ont été spécifiquement sélectionnés afin de mettre de l'avant l'analyse de l'influence du paramètre d'avance sur les dimensions des fils. Pour ce faire, le même peigne et le même titrage des différents fils ont été utilisés.

Ensuite, pour les tissus SERGÉ analysés, ceux-ci possèdent non seulement une variation de leur paramètre d'avance, mais aussi d'une variation de l'espacement du peigne. Il sera possible de valider à la fois l'influence de ces deux paramètres sur les largeurs de fils de trame et de chaîne de ces tissus couche à couche. La figure 3.7 présente un aperçu numérique du tissu NCS-2 (a) et SERGÉ-3 (b).

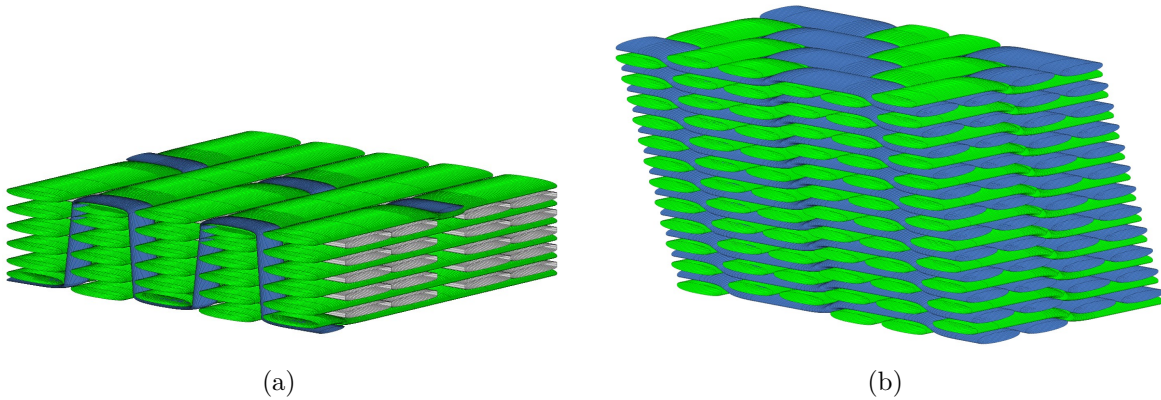


Figure 3.7: Représentation numérique du tissu NCS-2 (a) et du tissu SERGÉ-3 (b)

Suite à la présentation des propriétés des tissus, une analyse dimensionnelle a permis d'analyser l'impact des paramètres de fabrication ciblés et de l'épaisseur du tissu sur la géométrie des tissus. La mesure de largeur des fils de trame, des fils de chaîne et des fils de liage a été effectuée à l'aide d'images présentant la vue de dessus des tissus. Les images ont été prises avec une caméra (K-x, Pentax) de 12mpx et une lentille de type macro possédant un ratio

de grossissement de 1 : 3. Cinq mesures de largeur moyenne ont été prises pour chaque fil. Ces données de largeurs de fils ont été recueillies à l'aide du logiciel Webplotdigitizer [60]. La mesure de l'épaisseur des tissus a été effectuée suivant la standard ASTM D1777. Dix mesures d'épaisseur ont été effectuées sur chaque tissu. Un exemple du processus de prise de mesures de la largeur des fils est présenté à l'annexe B.

3.4.2 Résultats et analyse

Tableau 3.2: Présentation des données géométriques mesurées sur des tissus 3D types

Nom du tissu	Largeur des fils ± Écart-types (mm)			Épaisseur du tissu ± Écart-type (mm)
	chaîne	Trame	Liage	
NCS-1	2,21±0,03	2,17±0,02	1,36±0,04	4,32±0,06
NCS-2	2,24±0,03	2,49±0,03	1,36±0,04	4,24±0,02
NCS-3	2,20±0,06	2,49±0,03	1,39±0,08	6,54±0,06
SERGÉ-1	3,14±0,04	3,21±0,05	N/A	3,67±0,06
SERGÉ-2	3,11±0,04	2,92±0,06		4,09±0,03
SERGÉ-3	2,49±0,03	2,50±0,04		11,26±0,19

Les résultats des données mesurées sont présentés au tableau 3.2. L'analyse de ce tableau est présentée séparément pour les deux familles de tissus.

Tissus NCS

Le premier constat qu'il est possible d'effectuer est la constance de la largeur mesurée des fils de chaîne parmi les trois différents tissus, soit 2,21mm (NCS-1), 2,24 (NCS-2) et 2,20 (NCS-3). Cette constance est reliée à l'espacement du peigne (3,175mm) qui est le même pour les trois tissus. Ensuite, si l'on analyse les valeurs de largeur des fils de liage, celles-ci sont une fois de plus toutes très similaires. Ce constat corrèle avec le paramètre constant du peigne utilisé.

Le second constat est quant à lui attribué à la variation du paramètre d'avance des tissus présenté au tableau 3.2. L'influence de l'avance, qui est de 2.352mm pour le NCS-1 et 2.856mm pour les deux autres tissus, est directement reflétée sur les largeurs des fils de trame.

Ces largeurs sont respectivement de 2.17mm pour le NCS-1 et 2.49mm pour les NCS-2 et NCS-3.

Finalement, il est possible de comparer l'épaisseur des tissus NCS-1 et NCS-2 puisque ceux-ci possèdent le même nombre de couches, la même architecture et les mêmes titrages des fils, mais une longueur d'avance différente. De ce fait, on remarque que pour une plus faible longueur d'avance, l'épaisseur du tissu NCS-1 est légèrement supérieure, soit de 0,08mm, au tissu NCS-2.

Tissus Sergé

Le paramètre d'espacement du peigne est cette fois-ci différent entre les tissus, soit de 3.175mm pour les deux premiers tissus et 2.50mm pour le SERGÉ-3. En comparant ces valeurs d'espacement avec les largeurs des fils de chaîne, on remarque que les valeurs de largeur semblent être influencées proportionnellement par le paramètre d'espacement du peigne et que leurs valeurs sont très similaires. Comparativement à une structure NCS, les tissus SERGÉ possèdent une armure balancée. Cet équilibre entre les fils pourrait expliquer en partie cette similarité marquée entre la largeur des fils de chaîne et la valeur d'espacement du peigne.

Ensuite, pour ce qui est de la longueur d'avance utilisée pour fabriquer ces tissus, la largeur des fils de trame semble aussi converger vers ce paramètre. Finalement, pour ce qui est de l'épaisseur de tissus SERGÉ-1 et SERGÉ-2, l'influence de la longueur d'avance semble plus significative sur ce type de tissu puisque l'écart d'épaisseur entre les deux tissus est de 0,42mm. Ainsi, il est possible d'affirmer que les largeurs des fils des tissus SERGÉ sont très sensibles aux deux paramètres de fabrication identifiés.

3.4.3 Taux de couverture des fils

Finalement, le taux de couverture de la largeur des fils par rapport aux paramètres d'avance et d'espacement du peigne est présenté au tableau 3.3. Ce tableau permet de quantifier l'influence des paramètres critiques sur la largeur des fils. D'une part, le taux de couverture de la largeur des fils de trame par rapport aux valeurs d'avances des tissus, se situe entre 86,8%(SERGÉ-2) et 92,3%(NCS-1) pour tous les tissus. Malgré ce léger écart, les valeurs moyennes des taux de couverture des fils de trame pour les deux familles de tissus sont presque identiques, soit de 88,9% (NCS) et 89,0% (SERGÉ). Ainsi, l'influence du paramètre d'avance semble définitivement avoir le même impact sur ces deux types de tissus.

Tableau 3.3: Présentation du taux de couverture de la largeur des fils en fonction des paramètres d'avance (trames) et l'espacement du peigne (chaînes)

Tissus	% de couverture de la largeur des fils par rapport à l'avance (trames) et l'espacement du peigne (chaînes)			
	Trames	Bourreurs (NCS)/ chaînes (SERGÉ)	Liages (NCS)	Bourreurs+Liages (NCS)
NCS-1	92,3%	69,6%	21,42%	91,0%
NCS-2	87,2%	70,6%	21,42%	92,0%
NCS-3	87,2%	69,3%	21,89%	91,2%
Moyenne	88,9%	69,8%	21,6%	91,4%
SERGÉ-1	92,1%	92,0%		
SERGÉ-2	86,8%	91,0%		N/A
SERGÉ-3	88,0%	87,6%		
Moyenne	89.0%	90.2%		

D'une autre part, pour ce qui est de l'influence de l'espacement du peigne sur le taux de couverture de la largeur des fils de chaînes, celui-ci est encore plus marqué. Pour les tissus NCS, deux fils bourreurs et un fil de liage composent un espacement du peigne. L'addition de la largeur de ces trois fils permet d'obtenir de taux de couverture de 91,0% (NCS-1), 92,0% (NCS-1) et 91,2% (NCS-1). Ensuite, pour les tissus SERGÉ, une plus grande variation est observée, soit de 92,0% pour le SERGÉ-1, 91,0% pour le SERGÉ-2 et 87,6% pour le SERGÉ-3. Pour terminer, les taux de couvertures présentées permettent non seulement de quantifier l'influence des paramètres critiques de fabrication, mais aussi de fournir tendances approximatives sur la largeur des fils intéressante pour le développement d'un modèle simple et rapide.

3.5 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, l'étude détaillée du fonctionnement d'un métier à tisser 3D numérique du GroupeCTT a été présentée. L'analyse de l'influence de chaque système du métier à tisser et de leur interaction a permis de cibler des paramètres de fabrications critiques. L'avance du tissu relié à la traction du tissu et l'espacement entre chaque dent du peigne ont été identifiés comme des paramètres critiques. Leurs influences ont été évaluées et quantifiées. Il en est ressorti que ces deux paramètres sont effectivement reliés étroitement à certaines

dimensions géométriques des tissus. Malgré la faible quantité d'échantillons présentés, soit six tissus répartis en deux familles, ces premières analyses permettent d'orienter le développement du modèle, qui est présenté au prochain chapitre.

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT D’UN MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DES STRUCTURES TISSÉES 3D

4.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, l’approche de modélisation des tissus interlock 3D est présentée. Cette approche est principalement basée sur les besoins du partenaire industriel et sur les lacunes des méthodes de modélisation actuelles présentées au chapitre 3. La compréhension du fonctionnement d’un métier à tisser 3D numérique et les tests préliminaires présentés au chapitre précédent ont grandement influencé les lignes directrices du modèle. Celui-ci a été développé à l’aide du logiciel MATLAB. Ce logiciel de programmation a été sélectionné puisqu’il fournit des outils de programmation flexibles et efficaces, tels que la simplicité de son langage, la facilité de représenter graphiquement des données et son efficacité dans la manipulation de grandes matrices.

Avant de commencer la description du modèle, il est important de présenter les principaux requis de modélisation du partenaire. Premièrement, en ce qui a trait aux types de tissus à modéliser, le modèle doit être apte à modéliser toutes les variations des tissus interlock 3D, soit des tissus avec un liage à angle ou orthogonal traversant une ou plusieurs couches. Deuxièmement, la taille des tissus à modéliser ne doit pas être limitée. Troisièmement, le modèle doit être relié au logiciel de fabrication des tissus, EasyJC, du GroupeCTT via la lecture de fichiers de type *CSV*. Quatrièmement, l’exportation du modèle 3D sous forme de fichier *STL* doit être possible. La génération du modèle doit être calculée en moins de quelques minutes. Finalement, les données dimensionnelles telles que l’épaisseur et la fraction volumique du tissu modélisé doivent être calculées.

Bref, la nouvelle approche de modélisation décrite dans ce chapitre va tenter de répondre à tous ces requis. D’ailleurs, divers ouvrages publiés au courant des travaux de maîtrise ont déjà en partie présenté les lignes directrices de ce modèle. [61–65].

4.2 Structure du modèle

Pour débiter la présentation du modèle développé, un aperçu de la structure globale de celui-ci est présenté à la figure 4.1. Cette idéalisation de la structure du code permet d’englober les grandes lignes de la structure du modèle. Le premier point marquant de l’architecture

du code est l'écriture de celui-ci sous forme procédurale. La programmation procédurale a été adoptée étant donné qu'elle permet de simplifier la rédaction du code étape par étape. Ceci dit, le fichier *script procédural* lit dans l'ordre les fonctions des quatre grands groupes présentés à la figure 4.1.

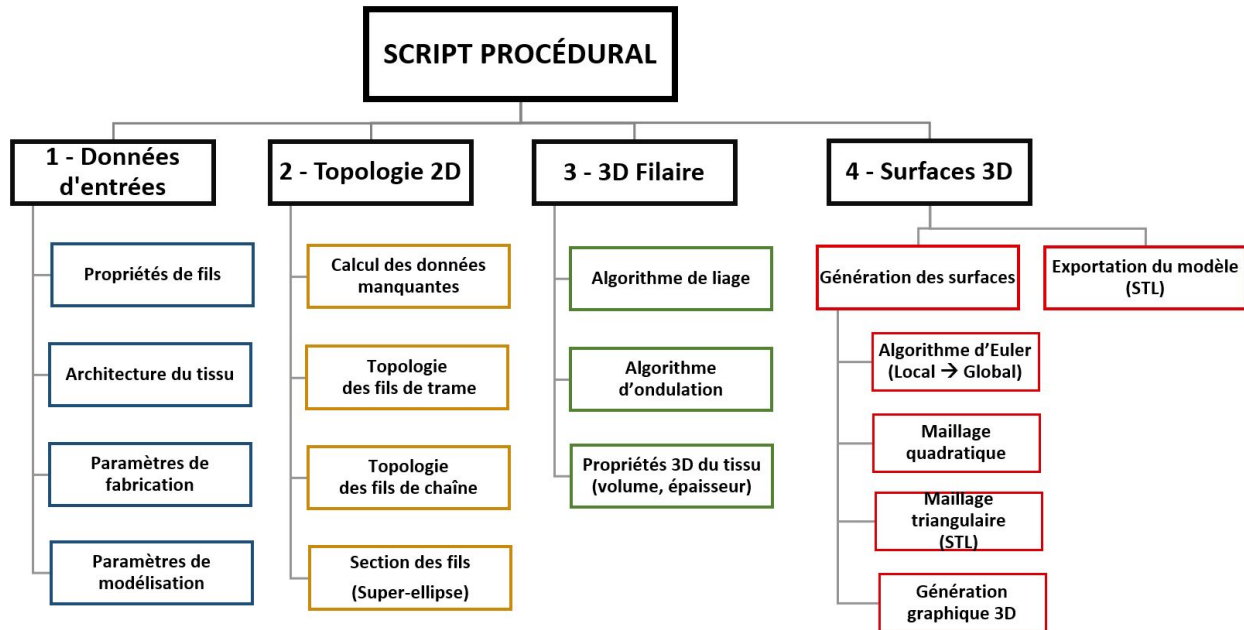


Figure 4.1: Présentation des 4 grandes étapes consécutives du modèle permettant de modéliser un tissu 3D

Le premier regroupement de fonctions, soit celui des données d'entrée, contient toutes les fonctions permettant de récupérer les informations sur les propriétés des fils, l'architecture du tissu, les paramètres de fabrication et de modélisation. Toutes les données d'entrée sont ensuite organisées selon une structure matricielle intuitive par rapport à l'architecture générale d'un tissu, soit selon la topologie 2D du tissu.

Le deuxième groupe permet de calculer les propriétés des fils manquantes. Il permet de définir les plans XZ initiaux et finaux des fils de trame et les plans YZ critiques des fils de chaîne. Les paramètres de fabrication, telle que la longueur d'avance et l'espacement du peigne. De plus, toutes les sections 2D des fils sont initialement générées dans un repère local.

Pour ce qui est du troisième groupe, celui-ci contient les deux principaux algorithmes du modèle, soit les algorithmes de liage et d'ondulation des fils. Plus précisément, ces algorithmes

permettent d'ajouter des sections de fil intermédiaires entre celles qui ont été initialement créées. Suite à l'obtention de ces données intermédiaires, il est maintenant possible de calculer l'épaisseur et la fraction volumique du tissu.

Finalement, le dernier groupe de fonctions est attribué à la génération des surfaces du modèle. Il est nécessaire de transformer toutes les matrices de données locales des sections 2D des fils dans un même repère global. La fonction *ROTATION* développée, qui se base sur le principe de rotation d'Euler, permet d'effectuer cette tâche. Ensuite, les différents maillages sont calculés afin de pouvoir afficher le modèle 3D dans le logiciel *MATLAB* ou de l'exporter du programme. Une description détaillée des concepts clés de cette structure procédurale est présentée dans les sections qui suivent de ce chapitre.

4.3 Paramètres d'entrée

4.3.1 Valeurs d'entrée exigées (EasyJC)

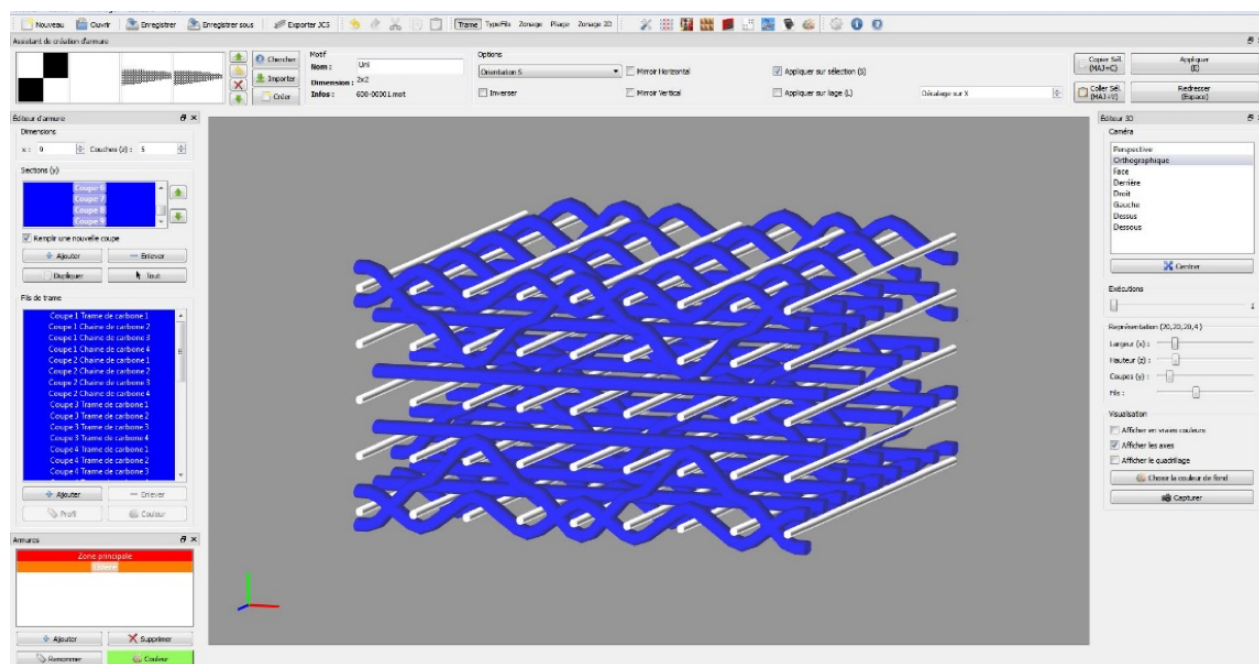


Figure 4.2: Présentation de l'interface du logiciel EasyJC permettant de définir l'architecture du tissu à fabriquer

Afin de diminuer considérablement le temps de modélisation des tissus, le modèle se base sur un grand nombre de valeurs d'entrée fournies par le logiciel EasyJC, tel que l'architecture des

tissus à modéliser. L'interface de ce logiciel est présentée à la figure 4.2. Cette figure présente l'éditeur interactif permettant de définir l'architecture du tissu. De plus, le titrage de chacun des fils peut être spécifié pour chacun des fils. Ces informations sont ensuite exportées sous forme de trois fichiers CSV. Le programme *MATLAB* du modèle peut ainsi lire les données d'entrée de ces fichiers *CSV*.

Tableau 4.1: Structure du fichier typefil.csv

Nom du fil	Nombre de fibres du fil (K)	# du fil
Fil de chaîne : Bourreurs	12	0
Fil de trame	12	1
Fil de chaîne : Liage	3	2

Tableau 4.2: Structure du fichier trame.csv

Plan XZ	Colonne #1	Colonne #2	Colonne #3	Colonne #4
Ligne #1	1	1	1	1
Ligne #2	1	1	1	1
Ligne #3	1	1	1	1

Tableau 4.3: Structure du fichier chaîne.csv

Id du fil	Position verticale			
	Plan YZ1	Plan YZ2	Plan YZ3	Plan YZ4
2	0	3	0	3
Ligne vide = changement de colonne de chaîne				
0	1	1	1	1
0	2	2	2	2
Ligne vide = changement de colonne de chaîne				
2	3	0	3	0
Ligne vide = changement de colonne de chaîne				
0	1	1	1	1
0	2	2	2	2

Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 présentent toutes les informations fournies par le logiciel EasyJC pour commencer la modélisation du tissu de la figure 4.3a . Le fichier *typefils.csv* représenté au tableau 4.1 permet d'indiquer le nombre de filaments et la numérotation de chacun des types de fils. Dans cet exemple, les fils de chaîne bourreur (0) et de trame (1) possèdent 12 000 (12K) filaments de carbone par fil et la chaîne de liage (2) 3 000 (3K).

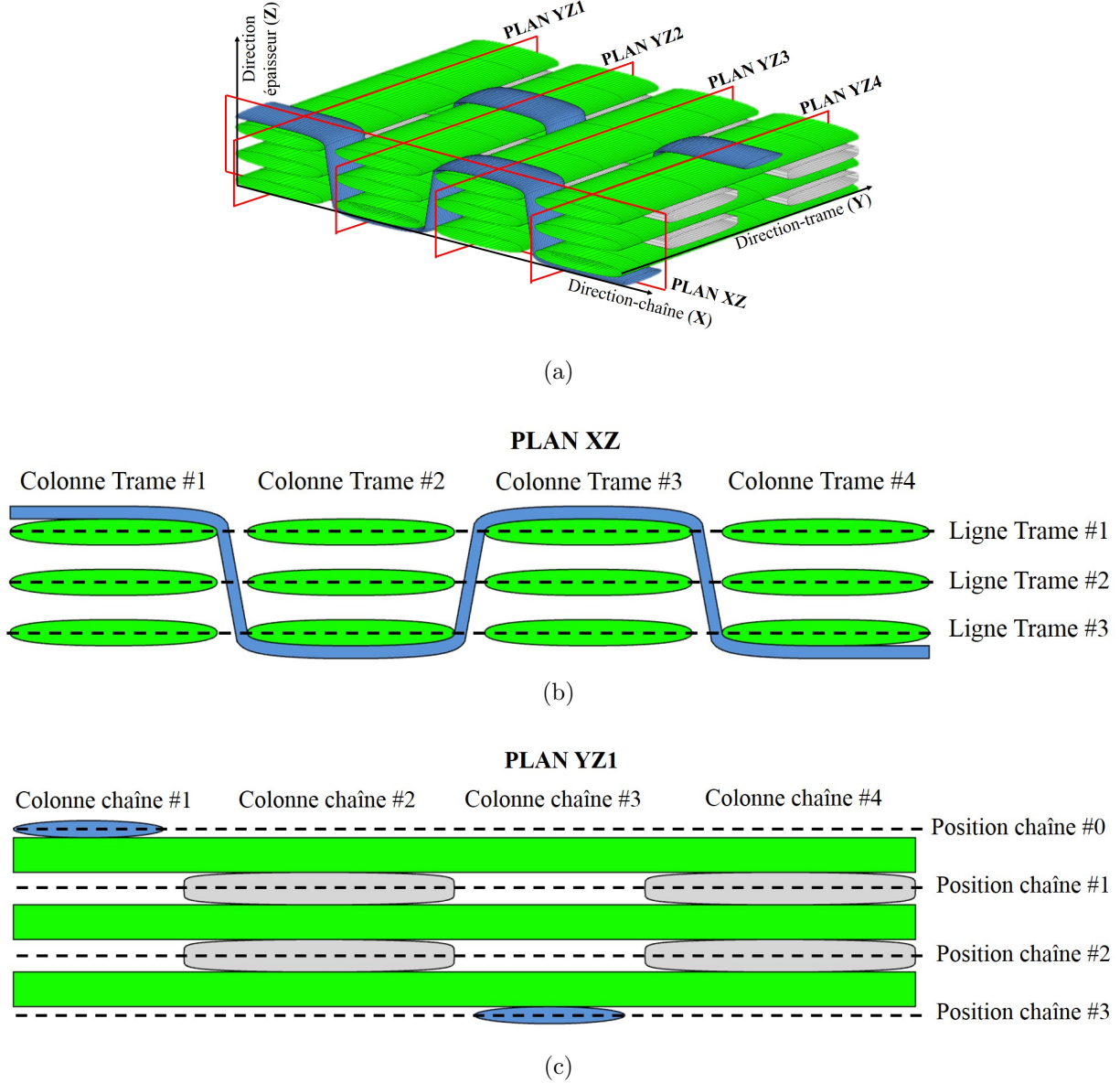


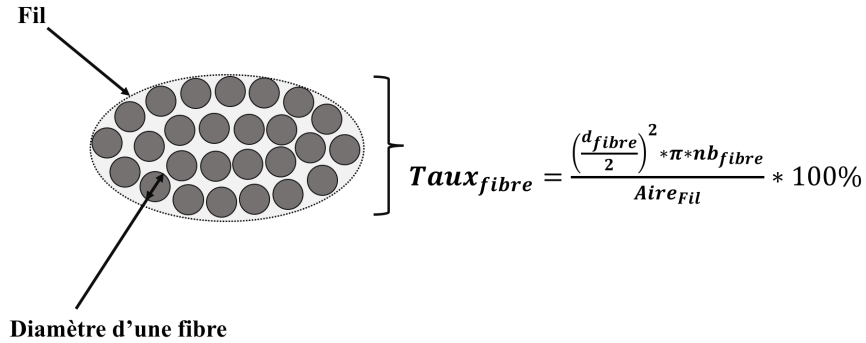
Figure 4.3: Présentation de la nomenclature des fichiers *CSV* générés par le logiciel EasyJC contenant les informations d'un tissu 3D interlock NCS (a) tel que l'architecture des ses fils de trame (b) et de chaîne (c)

Ensuite, le fichier *trame.csv* représenté au tableau 4.2 permet de définir la structure des fils de trame (1). Le plan XZ à la figure 4.3b présente la numérotation des colonnes et lignes qui permettent de définir la position des trames. Cet exemple possède 4 colonnes et 3 lignes de trames.

Finalement, le fichier *chaîne.csv* représenté au tableau 4.3 permet d'indiquer la trajectoire des fils de chaînes bourreurs (0) et de liage (2). La première colonne de ce tableau permet d'identifier le type de fil, soit (0) pour les fils bourreurs et le (2) pour les fils de liage. Les autres colonnes du tableau 4.3 permettent d'indiquer la position des fils de chacun des plans YZ. Le plan YZ1 est présenté à la figure 4.3c. Les positions des fils au plan YZ1 sont définies à la deuxième colonne du tableau 4.3. Une ligne vide dans le fichier *chaîne.csv* permet d'effectuer un changement de colonne des fils de chaîne. Pour terminer, cette technique d'identification va jouer un rôle critique dans la définition de la structure des variables du modèle.

4.3.2 Paramètres du modèle

Suite aux informations d'entrée fournies par le logiciel EasyJC, l'utilisateur doit donner des paramètres d'entrée supplémentaires avant de lancer la modélisation. Tout d'abord, des informations additionnelles sur les propriétés du tissu à modéliser sont requises. Celui-ci doit spécifier le type de tissu, soit un tissu *NCS* ou *SERGÉ*. Ensuite, pour chacun des types de fils, leurs taux de fibres volumiques et diamètres des fibres doivent être fournis. La technique utilisée pour calculer le taux de fibre d'un fil est présentée à la figure 4.4.



$$Taux_{fibre} = \frac{\left(\frac{d_{fibre}}{2}\right)^2 * \pi * nb_{fibre}}{Aire_{Fil}} * 100\%$$

Figure 4.4: Représentation de l'approche choisie pour calculer le taux de fibre surfacique d'un fil dans le modèle

Il est possible de constater que la compaction des fibres, soit les cercles gris sur la figure 4.4, est directement liée à la valeur du taux de fibre d'un fil. Il est à noter que dans la littérature, le taux de fibre de chaque fil peut grandement varier le long de sa trajectoire dans un tissu 3D

[66]. Toutefois, afin de simplifier et d'automatiser la modélisation des tissus, la compaction des fibres est considéré constant en tout point du fil. De ce fait, le calcul du taux de fibre surfacique de la figure 4.4 est équivalent au taux de fibres volumique. Basée sur des tendances dans la littérature [66–71], la valeur générale de 70% est utilisée comme point de départ pour tous les fils du modèle.

D'une autre part, l'utilisateur doit spécifier les paramètres du métier à tisser utilisés. En ce qui concerne les fils de trame, l'ordre d'insertion, la séquence de l'avance de la table de traction, la longueur de l'avance et l'angle de décalage entre les trames doivent être fournis. Pour ce qui est des fils de chaînes, la densité du peigne doit être spécifiée afin de calculer l'espacement entre celles-ci. De plus, un ratio de tension des fils de liage doit être fourni. Tous ces différents paramètres sont représentés sur un tissu 3D démonstrateur à la figure 4.5.

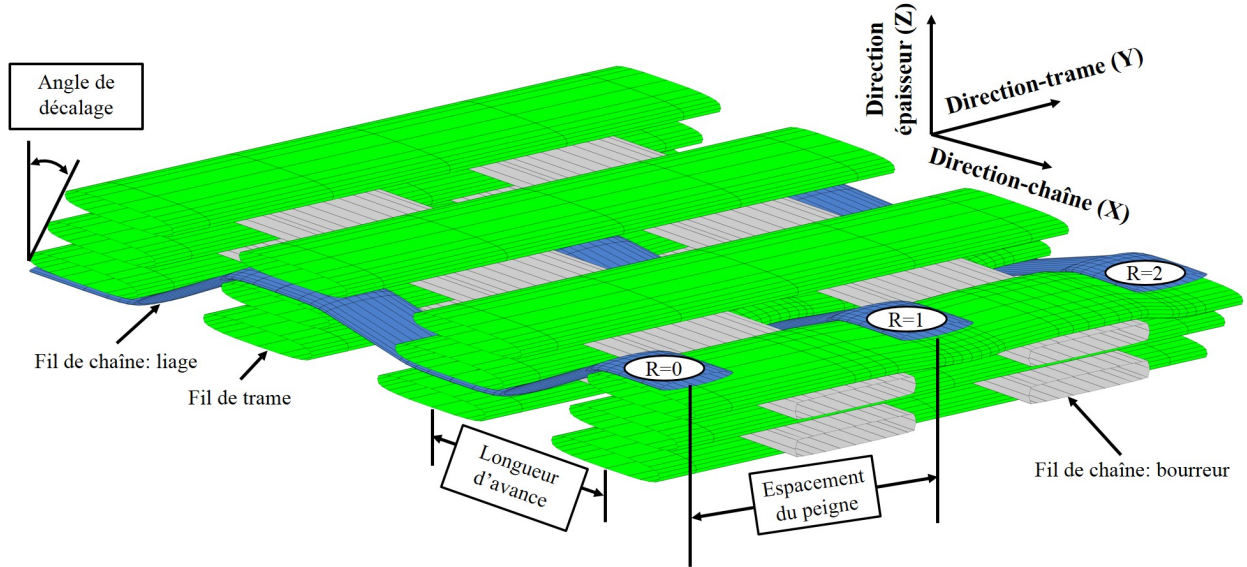


Figure 4.5: Représentation des paramètres critiques sur un tissu démonstrateur de type NCS

Pour ce tissu de type NCS, la densité du peigne, qui est convertie dans le modèle sous forme d'espacement entre les chaînes, est définie en fonction de la position des fils de chaînes dans le peigne. L'espacement du peigne équivaut à la distance entre chaque centre des dents du peigne. Dans ce cas si, il est appliqué entre les deux fils de liage. Du côté des trames, on peut remarquer sur la figure 4.5 que la longueur d'avance est appliquée entre chacune des trames adjacentes. Finalement, les ratios de tension empirique appliqués aux fils de liage sont

indiqués à chaque extrémité des fils à la figure 4.5. Le ratio «R» est défini empiriquement dans le modèle comme étant un multiple de la demi-hauteur de son fil de liage associé, tel que représenté sur la figure 4.6.

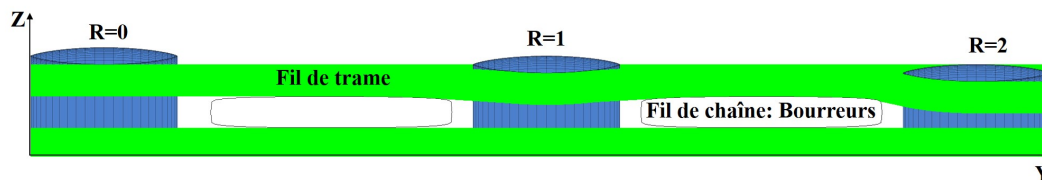


Figure 4.6: Représentation de l'influence du ratio de tension sur l'épaisseur (Z) à l'aide d'une vue du plan YZ du tissu 3D démonstrateur de la figure 4.5

La figure 4.6 présente différentes valeurs de ratios de tension pour un tissu de type *NCS*. L'application d'un ratio égal ou supérieur à 2 permet de soustraire l'influence du fil de liage dans le calcul de l'épaisseur du tissu. De ce fait, la valeur de ratio de 2 a été définie comme la valeur de référence du modèle pour ce type de tissu. Pour ce qui est des tissus ayant des liages à ACC, tous les paramètres sont appliqués de la même façon.

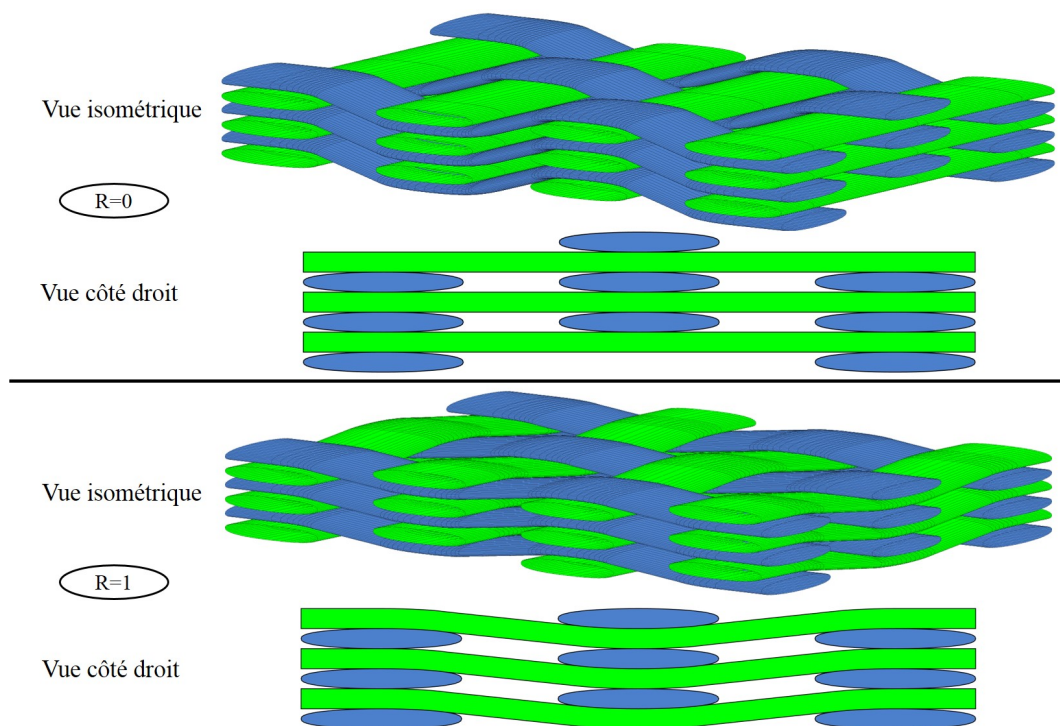


Figure 4.7: L'influence du ratio de tension sur un tissu ayant une armure de type *toile* sur 3 couches

La figure 4.7 présente un tissu ACC avec une armure sergé 2-2. La valeur du ratio de 1 permet d'équilibrer l'ondulation des fils de trame et de chaîne comparativement au ratio de 0. Ainsi, la valeur de 1 pour les tissus ACC a été définie comme valeur de référence.

Pour conclure la définition des paramètres du modèle, la conception de celui-ci est basée sur le fait que chacun des paramètres que l'utilisateur doit fournir nécessite très peu d'effort pour les obtenir. Une caractérisation du tissu à modéliser n'est certainement pas nécessaire pour générer un modèle 3D réaliste. Toutefois, comme présenté au chapitre précédent, l'utilisateur doit tout de même avoir un minimum de connaissance de l'équipement à utiliser pour fabriquer le tissu qu'il compte modéliser.

4.4 Section des fils

4.4.1 Définition de la section

Pour faire suite aux paramètres d'entrée du modèle, il est maintenant primordial de poursuivre avec la définition de la section des fils. Premièrement, toutes les sections du modèle sont composées de points et de lignes droites reliés entre eux afin de former un contour fermé. Cette approche fondamentale permet d'obtenir un contrôle simple et efficace sur les coordonnées de chacun des points d'une section d'un fil. Deuxièmement, une seule fonction elliptique généralisée permet de représenter l'entièreté des sections de fils du modèle. La définition de cette section est fondée sur l'équation d'une super-ellipse [72]. Les deux équations (4.1) et (4.2)

$$x = a * \cos^m(\theta) \quad (4.1)$$

$$y = b * \sin^n(\theta) \quad (4.2)$$

ont été implémentées dans le modèle. Ces deux équations permettent de définir les coordonnées 2D des sections super-elliptiques. De plus, il est possible d'attribuer pour chacun des quadrants d'une section, des valeurs différentes des exposants m et n et des longueurs de demi-axes a et b . La figure 4.8 permet de visualiser l'influence de ces exposants sur la forme de la section. Ce choix d'implémenter une définition par quadrant permet d'offrir une grande flexibilité de modélisation au modèle. Plus précisément, une définition par quadrant permet de générer des allures de courbures et des longueurs de demi-axes différents à chaque quadrant, soit une forme de sections non symétrique. Une étude sur ce sujet a été effectuée et est présentée à l'Annexe C

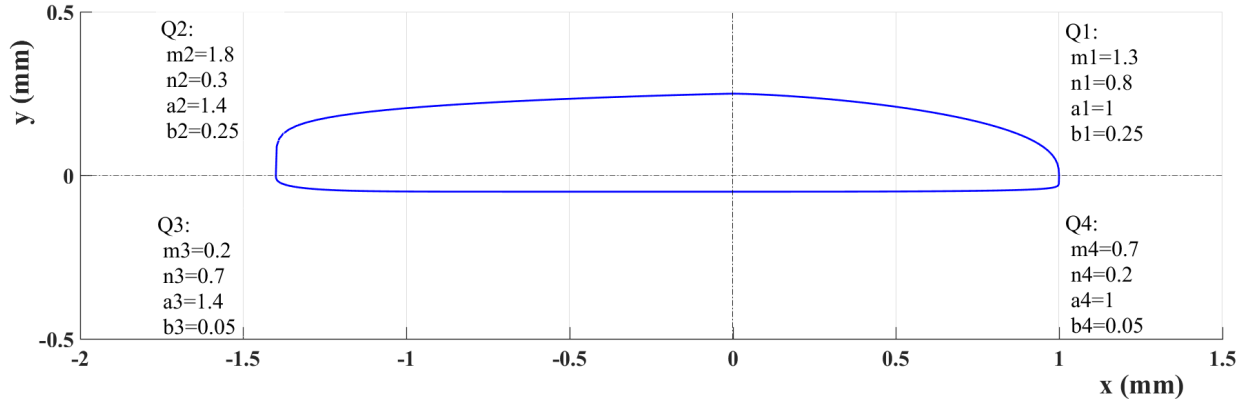


Figure 4.8: Représentation d’une section de fils divisée en quatre quadrants différents afin de constater visuellement l’influence des valeurs des exposants m et n sur la courbure de la section.

4.4.2 Détermination des variables d’une superellipse

Suite à la définition mathématique de la section des fils, certaines valeurs des équations (4.1) et (4.2) doivent être fournies par l’utilisateur. Premièrement, la mesure de largeur des fils, soit deux fois la longueur du demi-axe a peut être mesuré par l’utilisateur ou estimé par le modèle. La largeur estimée par le modèle est déterminée en fonction des moyennes recueillies au tableau 3.3. Les valeurs moyennes obtenues ont été implémentées dans le modèle. Il en reste que davantage d’échantillons devraient être évalués afin d’affirmer les tendances vérifiées de cette étude. Néanmoins, ces approximations permettent de donner un point de départ pour modéliser rapidement des tissus types. D’un autre côté, la mesure de largeur des fils prise directement sur un échantillon de tissu procure une bonne approximation et est relativement facile à réaliser.

Tableau 4.4: Présentation des exposants du modèle permettant de définir la courbure des sections 2D des fils

Types de tissu	Exposants (n ou m)	Valeurs des exposants du modèle		
		Bourreurs (orthogonal) Chaîne (à angle)	Liage	Trame
Orthogonal	m	1	1	0,8
	n	0,3	1	0,8
À angle	m	0,8	N/A	0,8
	n	0,8		0,8

Ensuite, pour ce qui est des exposants m et n , ceux-ci sont définis en se basant sur des tendances de courbures des sections présentées à multiples reprises dans la littérature [23, 44, 66, 67, 73]. Les valeurs d'exposant choisies sont présentées au tableau 4.4. Sur ce tableau, il est possible de remarquer que le fil bourreur du tissu orthogonal possède la plus petite valeur d'exposant, soit de 0,3 pour l'exposant n . Cette valeur implémentée dans l'équation (4.2) génère une allure de section rectangulaire typique des fils bourreurs. Pour le fil de liage d'un tissu orthogonal, ce dernier est défini comme une ellipse.

Ensuite, pour les fils de trames des deux tissus et de chaîne du tissu à angle, ils possèdent tous des valeurs d'exposants de 0,8. Cette valeur permet de générer une forme similaire à une ellipse, mais légèrement plus aplatie. Enfin, avec toutes ses informations fournies au modèle, ce dernier est maintenant en mesure de calculer la dimension manquante de la section, soit la demi-hauteur b .

4.4.3 Calcul de la demi-hauteur des sections

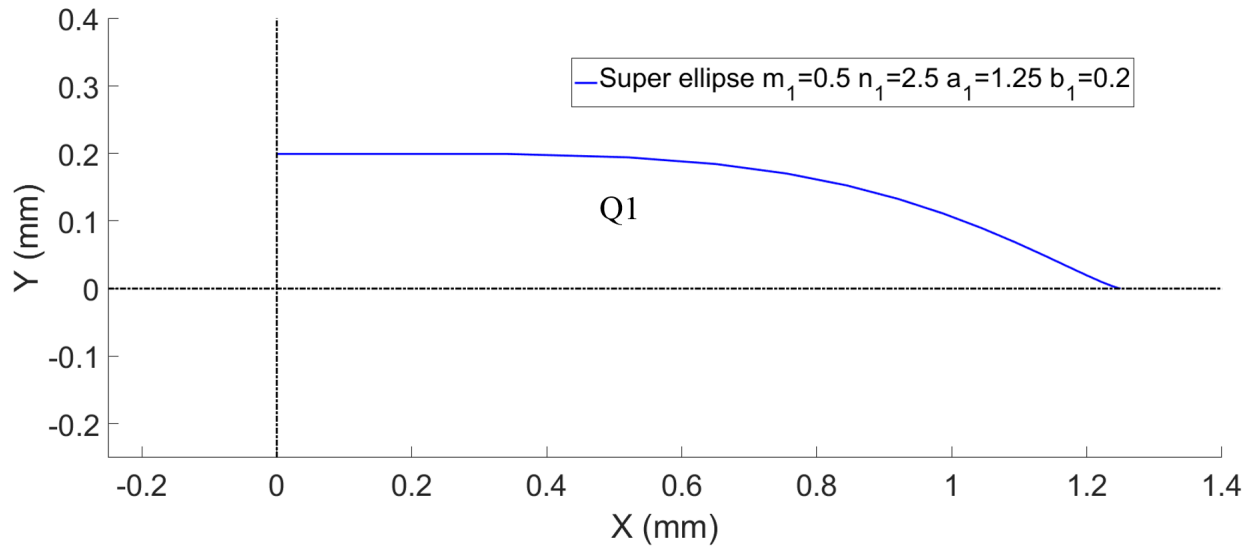


Figure 4.9: Représentation d'une courbe elliptique générée à l'aide des équations 4.1 et 4.2 développés

Le calcul de cette longueur de demi-axe b nécessite de passer par le calcul de l'aire d'une équation super-ellipse modifiée. Afin de calculer l'aire d'une section, il est nécessaire de diviser le calcul par quadrant. La figure 4.9 illustre un exemple de courbure permettant d'illustrer la

définition du calcul d'aire sous la courbe par quadrant. Les exposants m et n ont été définis de façon arbitraire pour représenter le comportement de la courbe. L'équation (4.3) permet de calculer l'aire de cette section partielle Q_1 .

$$\begin{aligned} Aire_{Q_1} &= \int_0^{a_1} y dx \\ &= \int_0^{a_1} b_1 \sin(\theta)^{n_1} dx \end{aligned} \quad (4.3)$$

La démonstration de la résolution de cette intégrale est présentée. La résolution de l'équation (4.3) est inspirée de travaux similaires effectuant la démonstration du calcul d'aire d'une *power-ellipse* [25].

$$\begin{aligned} dx &= \partial (a_1 \cos(\theta)^{m_1}) \\ &= -a_1 m_1 \sin(\theta) \cos(\theta)^{m_1-1} d\theta \end{aligned} \quad (4.4)$$

Tout d'abord, la substitution de l'équation 4.4 à l'intérieur de l'équation (4.3) est essentielle afin de passer l'intégrale en coordonnée polaire à l'équation 4.5.

$$\begin{aligned} Aire_{Q_1} &= \int_{\pi/2}^0 \left(-a_1 m_1 \sin(\theta) \cos(\theta)^{m_1-1} \right) * (b_1 \sin(\theta)^{n_1}) d\theta \\ &= -a_1 b_1 m_1 \int_{\pi/2}^0 \sin(\theta)^{n_1+1} \cos(\theta)^{m_1-1} d\theta \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ensuite, étant donnée la complexité de résoudre à la main l'intégrale présentée à l'équation (4.5), celle-ci a dû être résolue grâce à un calculateur mathématique en ligne, soit *Wolframalfa* [74]. Le résultat de la résolution de cette intégrale est présenté à l'équation (4.6).

$$Aire_{Q_1} = \frac{a_1 b_1 m_1}{2} \frac{\Gamma(\frac{m_1}{2}) \Gamma(1 + \frac{n_1}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2}(m_1 + n_1 + 2))} \quad (4.6)$$

Où : $\forall m > 0$ et $n > -2$

La fonction Γ est une interpolation de la fonction factorielle [75]

Finalement, la formule finale permettant de calculer la demi-hauteur de chacune des sections est présentée à l'équation (4.7).

$$b_1 = \frac{2 Aire_{Q_1}}{a_1 m_1} \frac{\Gamma(\frac{1}{2}(m_1 + n_1 + 2))}{\Gamma(\frac{m_1}{2}) \Gamma(1 + \frac{n_1}{2})} \quad (4.7)$$

Suite à l’obtention de cette valeur manquante, la génération des points dans un repère local est effectuée une fois que l’utilisateur a spécifié le nombre de points par sections désirées en utilisant les équations (4.1) et (4.2).

Pour conclure la définition de la section des fils, l’instauration d’une équation de super-ellipse divisible en quadrant permet de donner une très grande flexibilité au modèle tout au long de son développement. De plus, cette approche adoptée permet de se différencier des autres modèles géométriques existant en offrant une grande liberté sur la modélisation de sections complexes.

4.5 Trajectoire des fils

Cette présente section représente le cœur de ce modèle géométrique, soit la définition de la trajectoire des fils. Fondamentalement, la trajectoire de chacun des fils est définie à l’aide d’une succession de points centraux positionnés à des endroits critiques et reliés par des lignes droites. Le positionnement initial des points centraux est déterminé grâce à l’architecture du tissu donnée par le logiciel EasyJC et grâce aux dimensions des sections des fils déjà calculés.

De plus, chaque point central est relié à une définition de section 2D du fil. Le nombre de points de toutes les sections 2D pour un fil doit être identique afin de pouvoir relier ces points par des droites.

4.5.1 Principe de corde sous tension

Afin d’améliorer le réalisme du modèle, l’implémentation du principe fondamental de corde sous tension a été intégré dans la définition de la trajectoire des fils. Ce principe de corde sous tension est généralement appliqué dans le modèle lorsqu’un fil de chaîne possède une trajectoire contournant des fils de trame, soit un fil de liage.

Les points centraux des fils de liage sont définis en fonction des sections de fils à contourner. Plus précisément, la section du fil de liage contourne le fil de trame via un contact linéaire entre les deux sections. Ce type d’interaction permet de contrôler précisément les risques d’interpénétration entre ces fils. La figure 4.10 représente ce principe de corde sous tension.

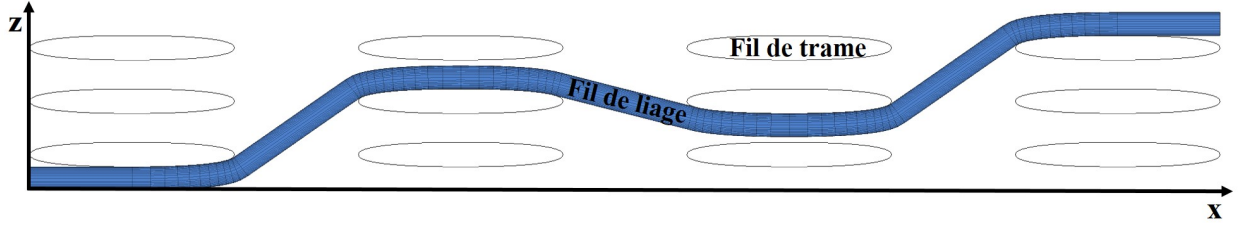


Figure 4.10: Représentation du principe de corde sous tension d'un fil de liage contournant les sections des fils de trame dans le plan XZ

Sur cette même figure, il est possible de constater que la discrétisation du fil de liage est directement liée au nombre de points formant les sections de trame. Un algorithme de tangence a été greffé à ce principe afin de contrôler les transitions entre chaque saut de section de fil de trame. Des critères d'angle entre la section initiale et finale de l'algorithme sont calculés afin de déterminer le nombre optimal de points centraux et sections de fil de liage à générer. Ces critères sont présentés à la figure 4.11a. Ceux-ci permettent d'optimiser la tangence du

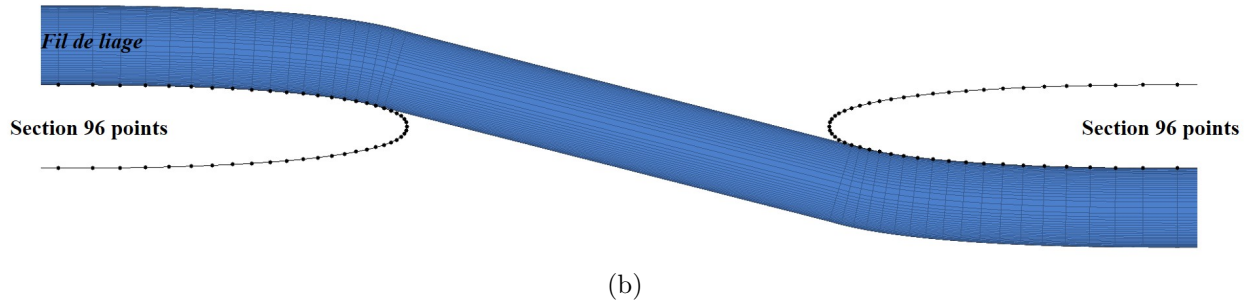
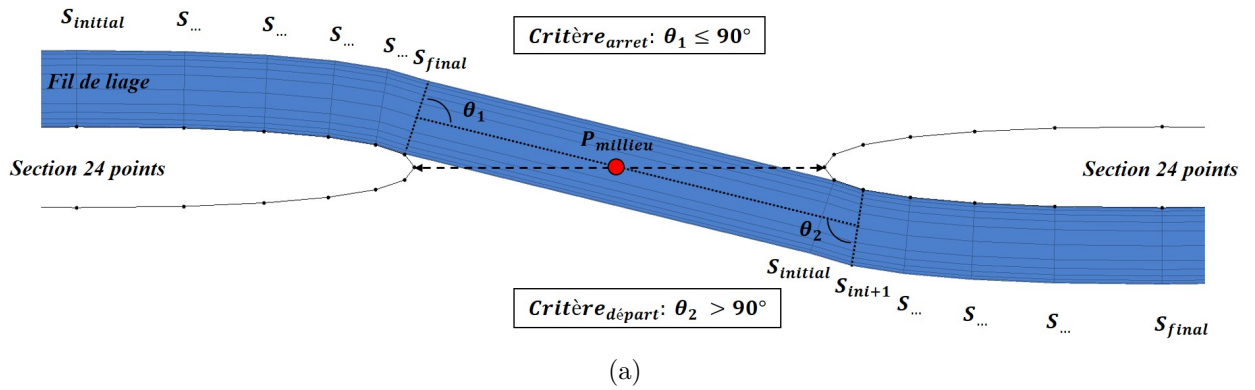


Figure 4.11: Illustration de l'algorithme de tangence développé afin d'optimiser le parcours des fils de liage (a) et un raffinement de 96 points (b)

fil de liage entre les deux sections de trame. Toutefois, étant donné un nombre fini de points constituant une section de fil, il n'est pas possible d'assurer une tangence parfaite. Dans ce cas, le nombre de points de la section des fils de trame joue un rôle important dans la précision de cet algorithme. La figure 4.11b démontre une nette amélioration de la fluidité du fil de liage par rapport au fil de liage présenté à la figure 4.11a.

4.5.2 Interactions entre les fils

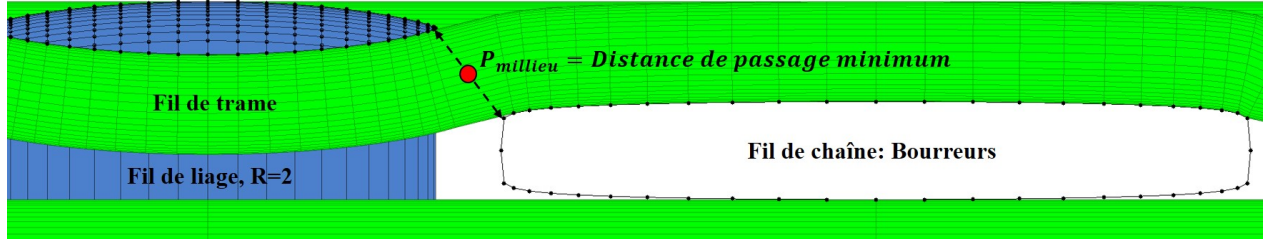


Figure 4.12: Implémentation d'un nouveau l'algorithme de tangence à l'ondulation des fils de trame

Suite à ce premier algorithme de tangence, un second algorithme a été développé pour traiter cette fois-ci de l'ondulation des fils de trame. Celui-ci permet de modifier la trajectoire des fils de trame lorsque ceux-ci sont en interaction avec les fils de liage. Cette zone d'ondulation est illustrée à la figure 4.12. Le ratio de tension, tel que présenté précédemment à la section 4.3.2, permet de définir l'amplitude de la modification de la trajectoire des trames.

L'algorithme d'ondulation des trames développé se base sur le même principe de génération des sections à l'aide des critères de départ et d'arrêt que celui des fils de liage. Toutefois, l'application du principe de tangence est plus complexe à implémenter dans le modèle puisqu'aucune donnée d'entrée ne permet de cibler les zones d'ondulation. Une fonction d'identification des zones d'ondulations des fils a été développée pour combler ce manque d'information initial. L'identification de ces zones est déterminée en analysant la trajectoire des fils de chaîne.

De plus, la définition du point milieu est plus complexe étant donné les formes de sections différentes entre les différents types fils de chaînes pour les tissus de type NCS. Ce calcul du point milieu pour l'algorithme d'ondulation est défini à la figure 4.12 comme étant la distance minimale entre les deux sections adjacentes permettant le passage du fil de trame. Plus précisément, la recherche de la distance minimale entre deux points est effectuée pour

déterminer le positionnement du point milieu se situant au milieu de cette distance.

Suite à l'obtention de toutes ces informations intermédiaires, l'algorithme d'ondulation est maintenant en mesure d'ajouter des sections supplémentaires afin de créer une ondulation dans les fils de trame.

4.6 Génération du 3D

Une fois la trajectoire des fils définie et les sections de fils attribuées à chacun des points centraux, la génération des surfaces des fils peut avoir lieu. Tout d'abord, chacune des sections 2D, qui sont initialement enregistrées dans un repère local, doit être repositionnée dans le repère global du tissu. Une fonction appelée *ROTATION*, qui est basée sur le principe de rotation des angles d'Euler [76], a été spécialement développée pour accomplir cette tâche.

Cette fonction prend en compte le positionnement filaire des points centraux, de la position locale des points de chaque section et de l'angle relatif des sections par rapport au repère global afin de calculer le positionnement final de chacun des points des sections. Une matrice de rotation a été implémentée dans cette fonction afin d'effectuer cette tâche. La convention de rotation utilisée est ZXZ pour les fils de trame et ZYZ pour les fils de chaîne.

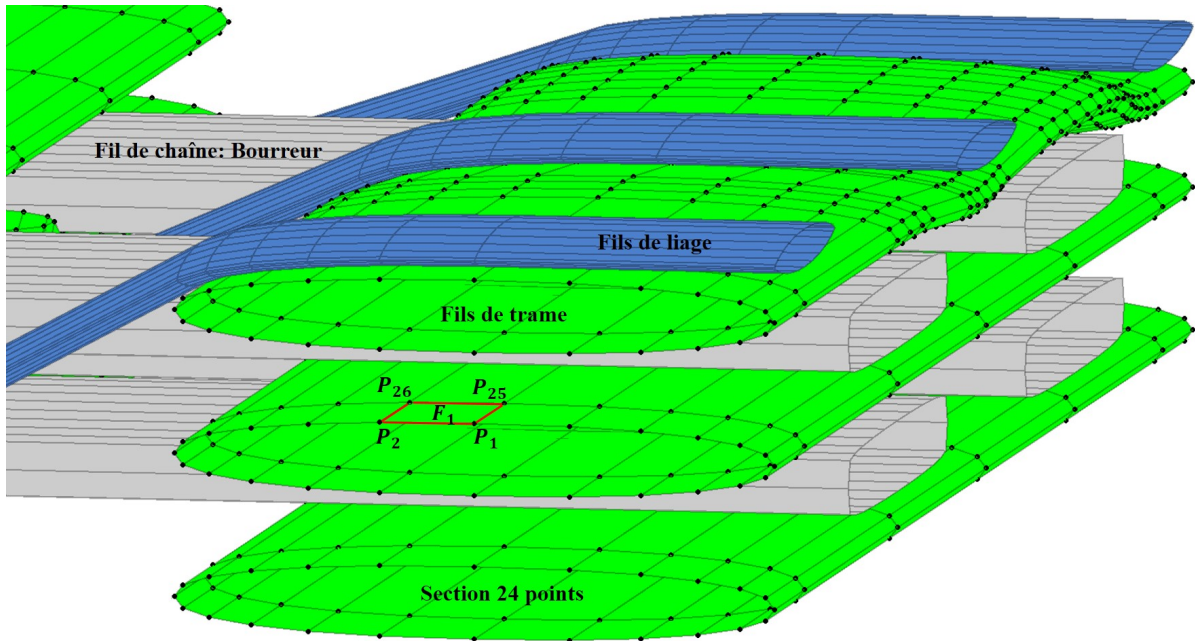


Figure 4.13: Présentation de la définition de la surface rectangulaire S1 délimitée par quatre points 1,2 et 25,26 de deux sections adjacentes d'un fil de trame

Ensuite, il est désormais possible de relier tous ces points ensemble pour créer des surfaces. Pour afficher le tissu directement dans *MATLAB* tel que présenté à la figure 4.13, des surfaces rectangulaires sont créées à l'aide d'une fonction spécifiquement développée.

Cette fonction permet de générer une matrice contenant les coordonnées de tous les points à relier, soit les *vertices*, et une seconde matrice contenant le regroupement logique de ces points en groupes de 4 afin de créer chacune des *faces* rectangulaires.

Par exemple, à la figure 4.13, les points des fils de trame sont affichés afin de faciliter la compréhension de cette fonction. Ainsi, pour un maillage de type quadrilatère, les points 1,2 de la première section et 25,26 de la seconde section forment ensemble la face 1. Toutefois, si l'utilisateur désire exporter le modèle 3D du logiciel, il est possible de générer un fichier au format *STL*, soit une génération de surfaces triangulaires. La génération de surfaces triangulaires revient à séparer les surfaces rectangulaires précédemment d'écrites en deux surfaces triangulaires. Le format *STL* a été spécifiquement sélectionné en vertu de sa grande compatibilité avec les logiciels de modélisation et d'éléments finis.

4.6.1 Analyse de convergence du maillage

La qualité du modèle 3D généré est directement reliée à la définition du nombre de points des sections choisis. Une analyse de convergence du raffinement du maillage est présentée. Il est à noter que puisque les dimensions de largeur et de hauteur des fils sont fixes peu importe le maillage choisi, celui-ci n'a aucune influence sur l'épaisseur du tissu. Toutefois, ce maillage a une influence sur la fraction volumique du tissu. C'est à ce niveau que les valeurs théoriques et celles du modèle divergent.

L'étude présentée à la figure 4.14 traite du pourcentage d'erreur relié à la définition de l'aire générée. Le tissu analysé est celui présenté à la figure 4.5. Les différentes propriétés des fils utilisés dans cette étude sont présentées dans la légende de la figure 4.14. À première vue, il est possible de remarquer que peu importe les dimensions des sections, les erreurs obtenues des différents fils sont très similaires. De plus, l'erreur associée à la fraction volumique du tissu complet a été ajoutée à cette étude afin de confirmer la similarité des résultats. Ainsi, on constate qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un nombre très élevé de points par section pour obtenir une erreur inférieure à 0,1%, soit entre 80 et 90 points pour toutes les formes de sections étudiées. D'ailleurs, la génération de ce tissu avec 90 points par section nécessite un temps de calcul inférieur à 15 secondes, ce qui est amplement court considérant les requis de rapidité du modèle.

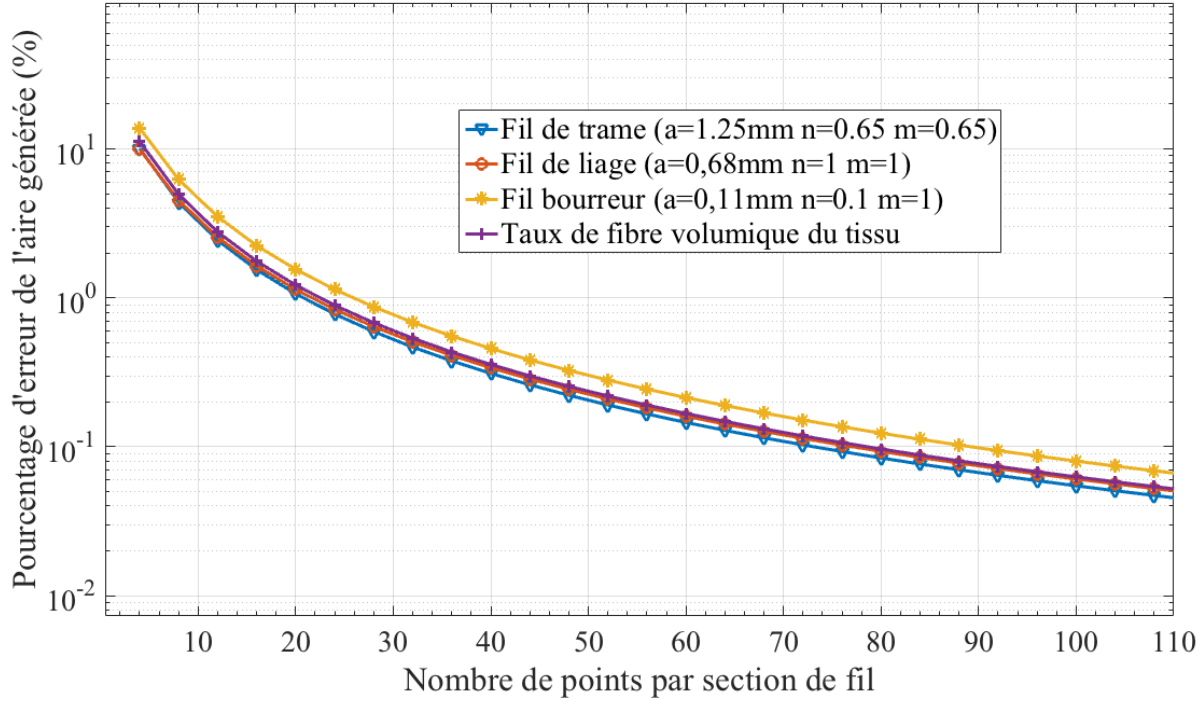


Figure 4.14: Étude de convergence du raffinement du maillage du modèle

Pour terminer cette étude, il n'est pas nécessaire de descendre en dessous de 0,1% étant donné qu'il existe d'autres sources d'erreurs dans le modèle qui sont plus importantes que celle-ci telles que la mesure de largeur des fils, la précision des valeurs des exposants n et m et le taux de fibre fixé à 70%.

4.7 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, le modèle géométrique présenté s'appuie sur des observations de la littérature et sur des observations expérimentales qui sont présentées au chapitre 3. Les sections des fils sont générées à l'aide d'une fonction de type super-ellipse. La trajectoire des fils est définie à l'aide d'un algorithme de liage et d'ondulation. Ceux-ci permettent de reproduire une trajectoire simulant le principe de corde sous tension et d'éviter tout risque d'interpénétration entre les fils en interactions. Le tissu modélisé peut être exporté du logiciel sous forme de fichier *STL*. L'épaisseur et la fraction volumique du tissu sont deux paramètres de sortie du modèle.

Actuellement, le modèle génère des sections de fils constantes sur toute la longueur de ceux-ci. Cette simplification permet d'automatiser la génération du tissu à modéliser. Un aperçu des performances de la définition actuelle du modèle par rapport à la réalité est présenté au prochain chapitre.

Finalement, ce modèle comporte certaines limitations. Le très grand nombre de configurations possibles de tissus 3D implique que certaines architectures complexes peuvent provoquer des erreurs au niveau du positionnement des points centraux des fils, ce qui peut occasionner des interpénétrations entre des fils. Le code du modèle a constamment été ajusté au courant du développement afin de pouvoir simuler tout type de tissu, mais son infailibilité ne peut être garantie. C'est au fur et à mesure de son utilisation avec différent tissu que ce dernier sera plus robuste étant donnée qu'il est impossible de prédire toutes les variantes d'architecture possibles des tissus 3D.

CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE

5.1 Introduction

Suite au développement du modèle géométrique, une caractérisation géométrique expérimentale a été réalisée sur des plaques composites à renfort textile 3D afin de valider la précision du modèle développé. Cette validation va permettre d'une part de comparer les résultats obtenus avec les tendances générales dans la littérature. D'autre part, elle va permettre de comparer les dimensions critiques de deux tissus 3D types avec les tissus réels. Afin de rendre cette analyse possible, diverses étapes sont nécessaires pour comparer la mésostructure d'un tissu 3D réel et modélisé. La prochaine section présente les travaux effectués pour être en mesure de fabriquer des plaques composites.

5.2 Fabrication de plaques composites renforcées de tissus 3D

Tout d'abord, afin d'être en mesure de caractériser la structure des tissus, il est nécessaire de fabriquer des plaques composites renforcées de structure textile 3D types. Les pièces composites obtenues pourront être par la suite polies afin d'être en mesure d'analyser leur architecture à l'aide d'images. Un total de six tissus 3D types devront être fabriqués. Le développement du procédé de fabrication et d'injection des tissus sont présentés dans cette section. Un aperçu des échantillons issus des plaques composites est présenté à la figure 5.1

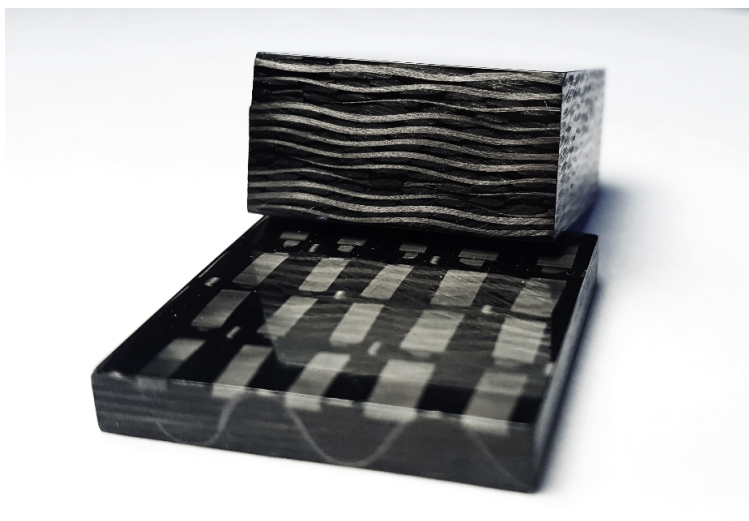


Figure 5.1: Présentation des pièces composites à renfort 3D à fabriquer

5.2.1 Conception et fabrication d'un moule d'injection

Le développement du procédé de fabrication des plaques composites est basé sur deux requis principaux. Le premier requis nécessite de fabriquer des pièces possédant les mêmes épaisseurs que celles présentées au tableau 3.2. Le second requis est de minimiser les porosités à l'intérieur de la plaque composite. Pour ce faire, un moule rigide ayant une profondeur de cavité spécifique à chaque tissu et l'injection par RTM ont été sélectionnés pour satisfaire ces requis. De plus, une contrainte budgétaire de 5 000\$ pour la fabrication complète du procédé doit être respectée. Ainsi, la conception d'un moule de type RTM léger à épaisseur variable a été réalisée.

Designs préliminaires

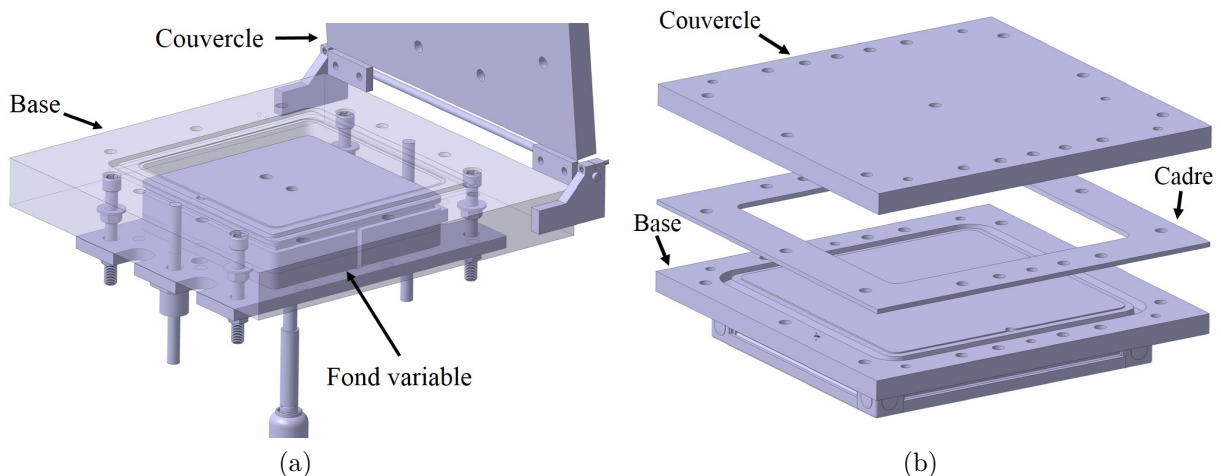


Figure 5.2: Présentation de deux moules RTM ayant soit une base variable (a) ou un système de cadre interchangeable 5.2b

Deux versions ont été développées afin d'atteindre les requis exigés. Ces deux moules sont présentés à la figure 5.2. Le premier design 5.2a de moule RTM permet d'ajuster la profondeur de la cavité centrale à l'aide d'un piston hydraulique.

Le second design à la figure 5.2b est un moule RTM qui est basé sur le principe de cadre afin de réguler la profondeur de la cavité. Tous les deux permettent de fabriquer des plaques composites carrées de 12 pouces. Une revue de design a été effectuée auprès des pairs et elle a permis de sélectionner la version 5.2b des moules développés. Le second design s'avérait une solution plus simple et moins coûteuse comparativement à la version 5.2a plus universelle, mais à un plus haut risque technologique. Toutefois, le moule à épaisseur variable développé

peut devenir une solution plus économique et efficace si on plus grand nombre de tissus à fabriquer est requis. Pour cette raison, le design de cette version a été ajouté à l'annexe E

Optimisation du design

Afin de limiter la présence de vide ou d'air dans les plaques, une pression de 100psi doit être appliquée à l'intérieur du moule. Cependant, l'application de cette pression sur la surface de la cavité de 12x12 pouces engendre des déformations dans la base et le couvercle du moule. Il est important de bien contrôler cette déformation afin d'obtenir une épaisseur de cavité constante. Cette épaisseur constante est nécessaire pour bien reproduire l'épaisseur du tissu mesuré à sec. Les valeurs d'épaisseur des tissus à sec ont été effectuées à l'aide de la norme *ASTM D1777* et sont présentées au tableau 3.2.

Ainsi, une analyse en éléments finis a été réalisée. Le logiciel *ABAQUS*[77] a été employé pour optimiser le design des renforts à ajouter au moule. Une analyse préliminaire du déplacement des points critiques sur le couvercle du moule a été effectuée. Le positionnement de ceux-ci est illustré à la figure 5.3.

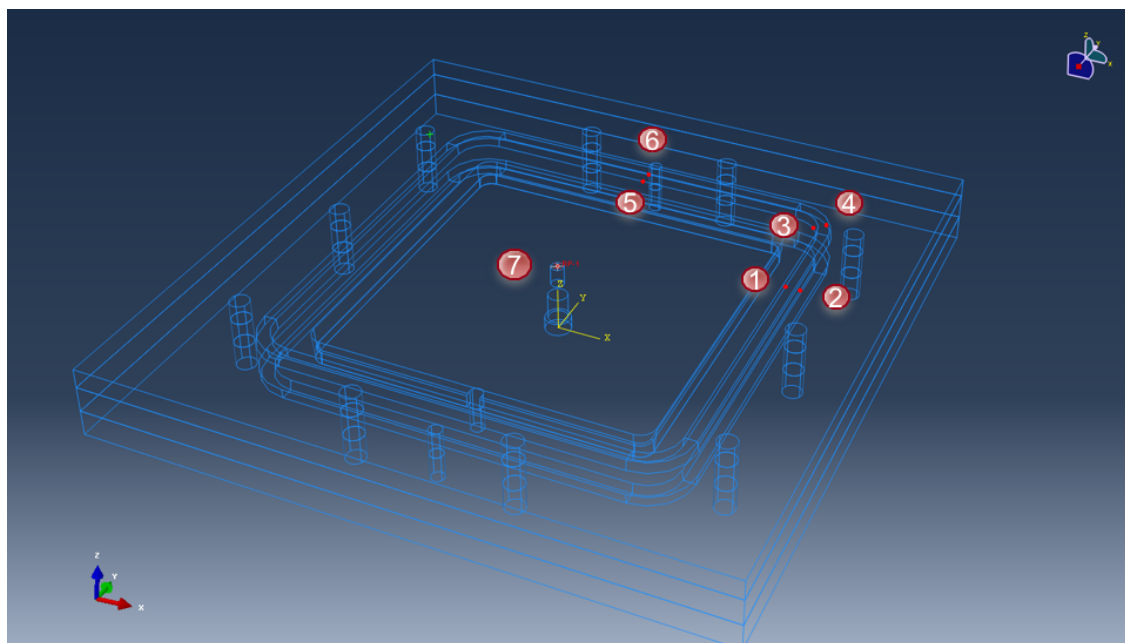


Figure 5.3: Illustration du positionnement des 7 points critiques, en rouge, à analyser la déformation du couvercle du moule

Sur la figure 5.3, les points 1 à 6 permettent d'identifier les déplacements maximaux que le joint d'étanchéité doit être en mesure de couvrir. Puis le point 7, soit le point milieu, permet

d'identifier le déplacement maximal du couvercle. Les épaisseurs de la base et du couvercle sont fixées à 1 pouce. En appliquant une pression de 100psi à l'intérieur d'un moule en aluminium, le point 7 s'est déplacé de 1,692mm tandis que les points 1 à 6 sont tous inférieurs à 0,375mm. Pour un moule fabriqué avec de l'acier, la valeur de déplacement maximal est de 0,605mm pour le point 7 et de 0,133 pour les autres points.

Ces résultats préliminaires permettent de valider que l'ajout de renforts pour la base et le couvercle du moule est nécessaire afin de minimiser davantage la déformation du couvercle et de la base du moule. Les différentes itérations de renforts qui ont été testées sont affichées à la figure 5.4. Chacune des configurations des renforts a été analysée pour deux types de matériaux, soit l'acier ou l'aluminium. Les profilés ont été conçus en tentant de minimiser le poids de ceux-ci afin de faciliter leur manipulation. Les résultats de déplacement sont présentés au tableau 5.1. Tout d'abord, le tableau 5.1 permet de valider que l'ajout de renforts

Tableau 5.1: Déplacements maximaux des différents renforts testés en éléments finis

Version du renfort	Largeur du profilé (in)	hauteur du profilé (in)	Matériaux du moule	Masse des renforts (kg)	Déplacement max du couvercle (mm)	Déplacement max de la base (mm)
Sans renfort	N/A	N/A	Acier	0	0,61	-0,46
Sans renfort	N/A	N/A	Alu	0	1,69	-1,12
Analyse des renforts basée sur un moule en aluminium						
T (5.4b)	3	3	Acier	17,7	0,23	-0,17
T (5.4b)	3	3	Alu	6,9	0,43	-0,29
Croix (5.4c)	3	3	Acier	13,1	0,16	-0,13
Croix (5.4c)	3	3	Alu	5,3	0,33	-0,24
H (5.4d)	3	3	Acier	18,7	0,13	-0,11
H (5.4d)	3	3	Alu	7,3	0,29	-0,21
I (5.4e)	4	4	Acier	36,5	0,07	-0,07
I (5.4e)	4	4	Alu	12,6	0,19	-0,16
Complexe (5.4f)	1,5	2,5	Acier	48,9	0,04	-0,03
Complexe (5.4f)	1,5	2,5	Alu	17,4	0,09	-0,08

au moule permet de réduire considérablement le déplacement du point milieu de la base et du couvercle. Ensuite, afin de sélectionner le renfort le plus adéquat, la décision se base principalement sur la valeur de déplacement minimale obtenue, soit idéalement inférieur à la précision d'usinage de 0,1mm. De cette optique, le renfort de type complexe en acier serait le plus adéquat. Toutefois, la masse de ce dernier est trop imposante pour pouvoir le manipuler manuellement. Ainsi, la sélection du renfort d'acier en I s'avère la meilleure solution puisqu'elle présente un déplacement du point milieu du couvercle et de la base inférieur à 0,1mm soit de 0,07mm et possède une masse de 9,1kg par renfort en I. De plus, le matériau

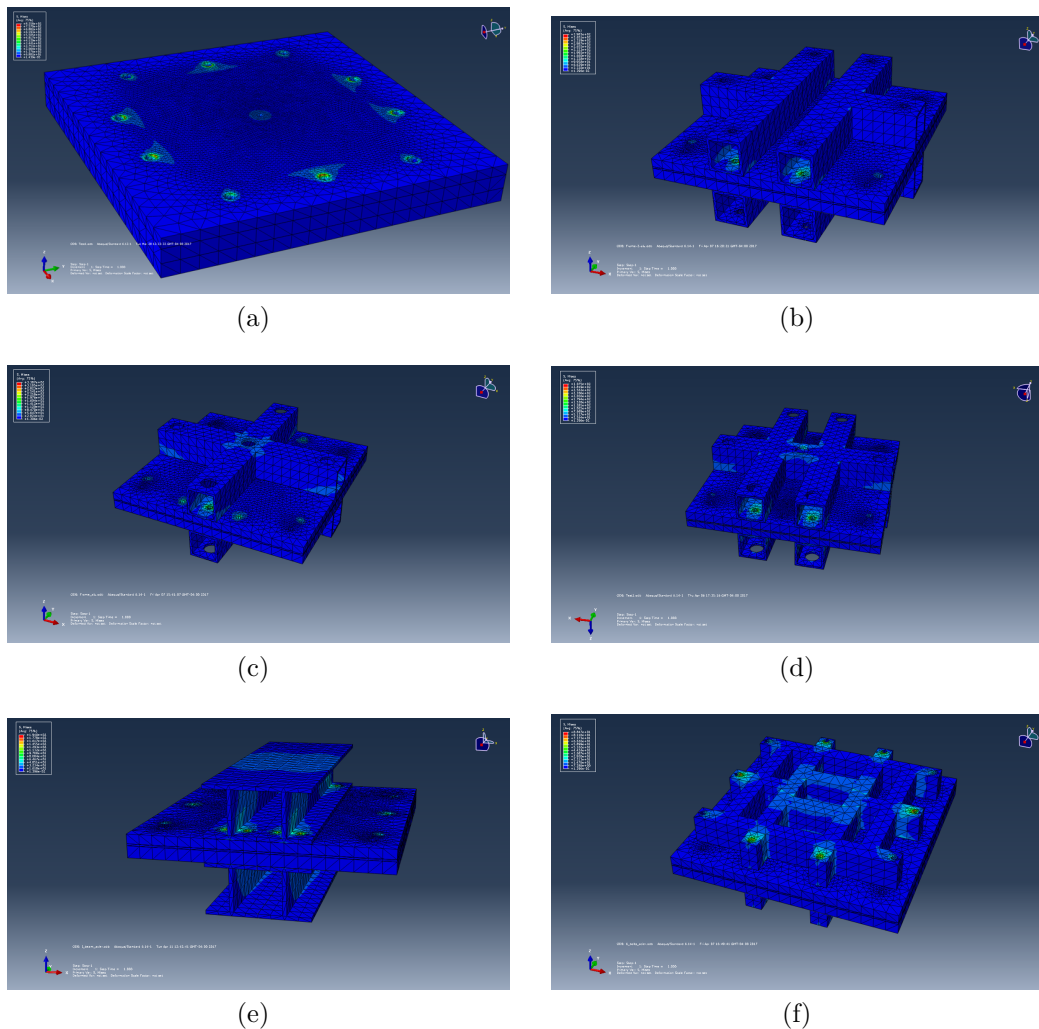


Figure 5.4: Présentation des modèles du moule (a) et des renforts en forme de T (b), de Croix (c), de H (d), de I (e) et complexe (f) testés dans le logiciel d'éléments finis ABAQUS

sélectionné pour fabriquer ce moule est l'aluminium. Ce dernier permet d'une part d'éviter d'investir dans un système de manipulation de la base et du couvercle. D'une autre part, un moule en aluminium permet de réduire considérablement les coûts d'usinage.

Design final

Le résultat final du moule envoyé en fabrication est présenté à la figure 5.5. Le prix final de ce dernier s'est élevé à **2893,59\$**. Tous les dessins 2D du moule sont présentés à l'annexe F. Suite à la présentation du procédé développé spécifiquement pour la fabrication de plaques composites à renfort 3D, l'injection des plaques est présentée.

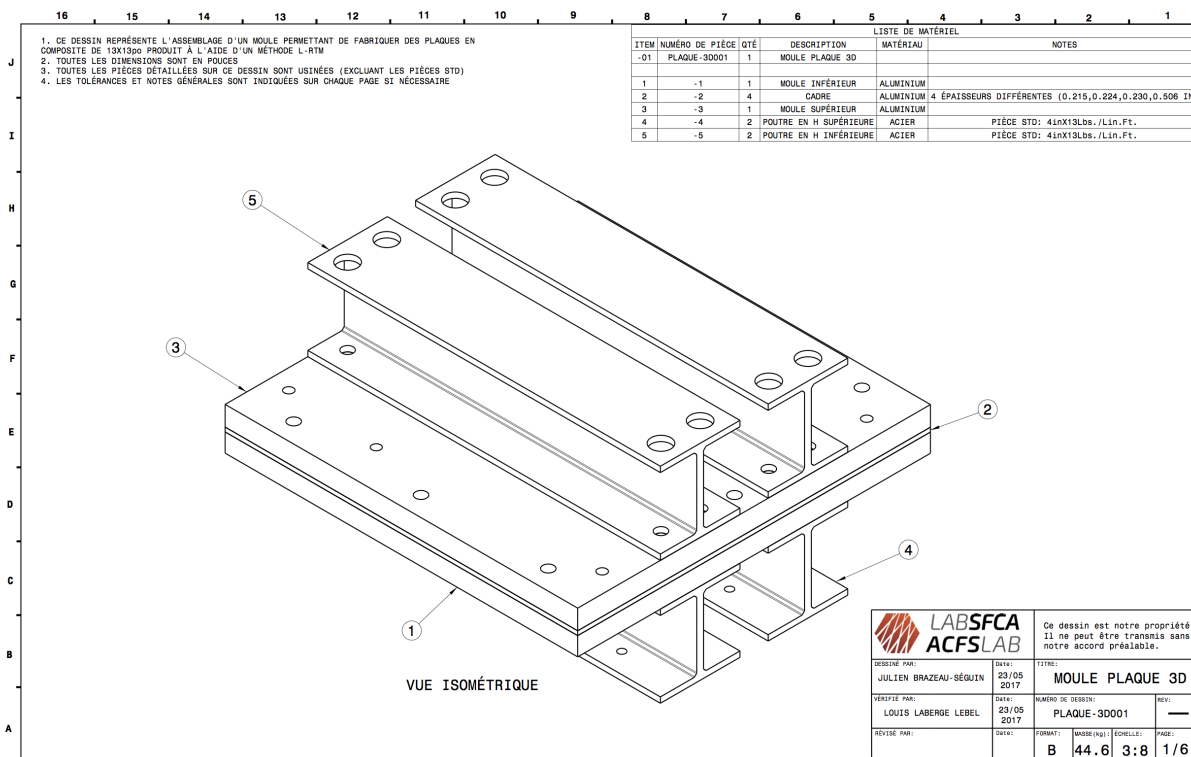
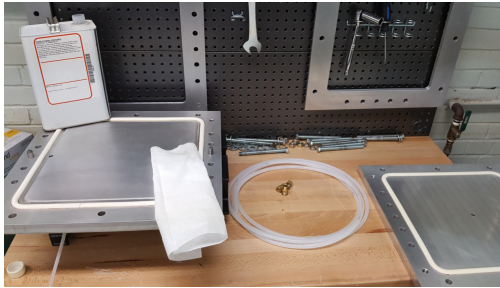


Figure 5.5: Présentation de la vue globale de la solution finale envoyée en usinage

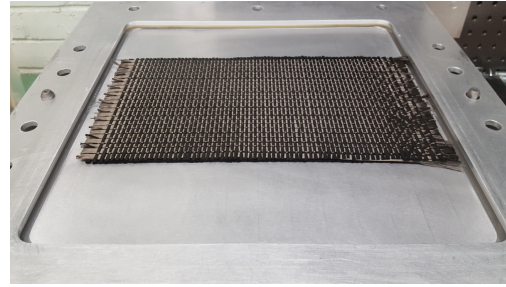
5.2.2 Injection des tissus

Avant d'effectuer l'injection des tissus 3D, des essais préliminaires sur des échantillons de tissus 2D ont été effectués pour développer une procédure de moulage efficace et répétable. Premièrement, le nettoyage et l'application de scellant doivent être effectués afin de recouvrir les porosités de toutes les pièces du moule en contact avec la résine. Par la suite, l'agent démoulant doit être appliqué tel qu'illustré à la figure 5.6a. Deuxièmement, le positionnement du tissu à l'intérieur du moule doit être effectué avec délicatesse afin d'éviter de propager des morceaux de fibre sur les joints du moule ce qui pourrait occasionner des fuites du système. Le positionnement d'un tissu 3D NCS de 12x6 pouces est illustré à la figure 5.6b.

Troisièmement, le moule a été conçu afin d'accueillir des joints d'étanchéité de type dynamiques. Ces joints possèdent une cavité interne pouvant être mise sous pression. De cette façon, il est possible de ne pas fermer complètement le moule lors d'une première étape d'injection afin de faciliter l'écoulement de la résine dans le tissu à l'intérieur du moule. L'ajout de rondelles métalliques tel qu'illustré à la figure 5.6c permet de contrôler l'ouverture du moule.



(a) Nettoyage et application de scellant & d'agent démoulant



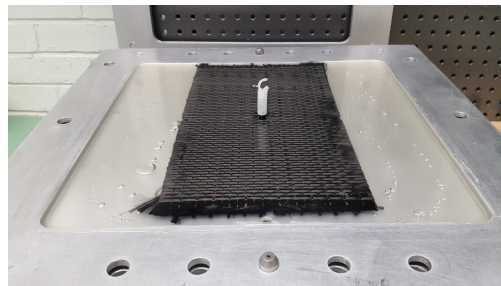
(b) Positionnement du tissu 3D à l'intérieur du cadre d'épaisseur spécifique



(c) Insertion des rondelles entre le couvercle et le cadre permettant d'effectuer une première étape d'injection (50psi) avec une cavité ayant une surépaisseur grâce à l'utilisation de joint d'étanchéité dynamique



(d) Fermeture complète du moule et augmentation de la pression d'injection (100psi)



(e) Démoulage de la plaque composite à renfort 3D à l'aide d'un système de vis sans fin

Figure 5.6: Illustration des étapes principales de fabrication des préformes 3D en pièces composites

De plus, l'ajout d'un canal de résine dans la base du moule permet d'effectuer une injection convergente vers le centre du tissu pour en ressortir au centre du couvercle. Quatrièmement, sur la figure 5.6d, la fermeture complète est effectuée et la pression maximale est atteinte.

Finalement, le démoulage de la plaque est effectué 24h après la cuisson de la résine Ad-

Tech 820 utilisée. Un système de démoulage à l'aide de vis a été implémenté aux quatre coins de la plaque afin d'aider au démoulage du couvercle et de la base. Une fois le couvercle retiré, la plaque composite est facilement retirée grâce aux angles de démoulage présents à l'intérieur du cadre. Pour terminer, la solution choisie pour fabriquer les plaques composites a été effectuée en fonction des contraintes du projet, toutefois, les variantes présentées peuvent être des solutions intéressantes pour un projet similaire avec des contraintes différentes.

5.3 Polissage des tissus

Les plaques à renforts 3D fabriquées doivent être découpées en petits échantillons et déposées dans une capsule cylindrique de 1.25po de diamètre. Ensuite, cette capsule est remplie en versant manuellement une résine d'enrobage spécifique (Epofix, Struers). Cette forme permet de positionner les échantillons dans le support des machines de polissage. La qualité du polissage des échantillons est critique afin d'obtenir des images nettes et détaillées. Un échantillon poli est affiché à la figure 5.7

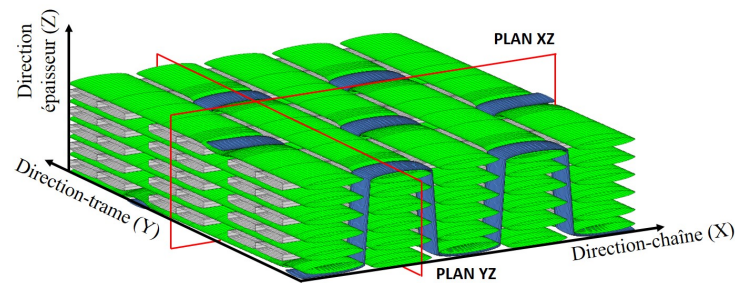


Figure 5.7: Présentation du format cylindrique requis pour polir un échantillon

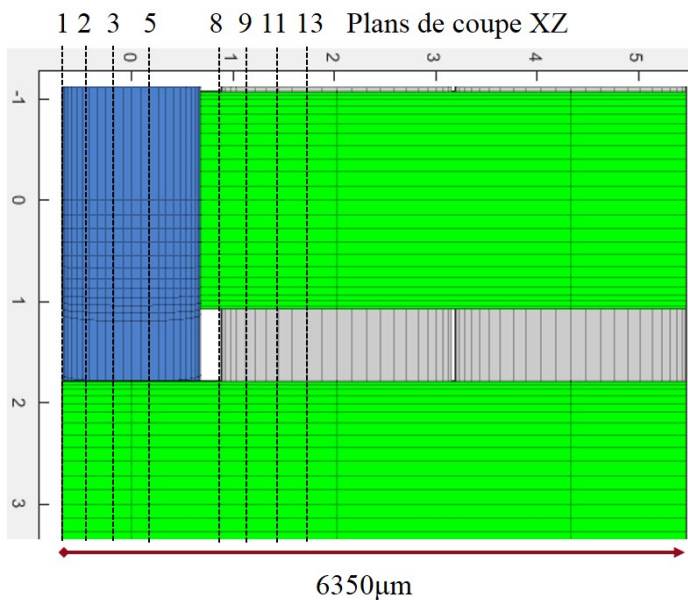
5.3.1 Procédure de polissage

La procédure de polissage utilisée est en partie basée sur la procédure du laboratoire *LABSFCA*. Des modifications à celle-ci ont dû être apportées afin de mieux l'adapter à la grande taille des échantillons à analyser. Aussi, l'arrivée d'une nouvelle machine de polissage au courant des

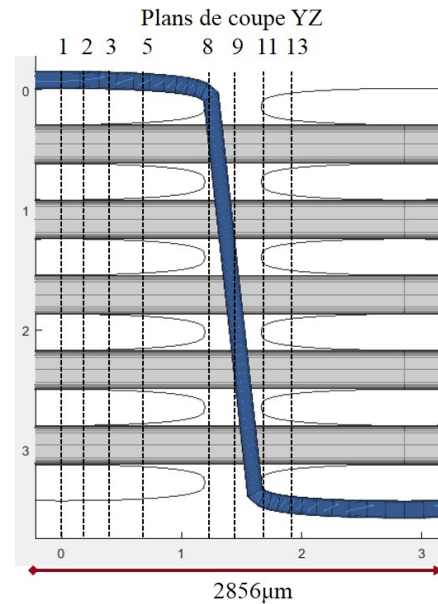
travaux a nécessité une fois plus des ajustements à la procédure afin d'utiliser cette dernière. Le modèle de la machine de polissage utilisé est *Tegramin 25* de Struers. Un plan de polissage spécifique a été établi afin de pouvoir analyser les tissus et de comparer leurs dimensions avec le modèle. Des prises d'images doivent être effectuées dans les plans XZ et YZ des tissus à des endroits précis. De ce fait, plusieurs essais de polissage ont été effectués afin de pouvoir bien contrôler la quantité de matière à retirer entre chaque prise d'images. La figure 5.8 présente le plan de polissage effectué pour analyser le tissu NCS-2. Sur la figure 5.8c il est possible



(a) Présentation de la vue isométrique du tissu NCS-2



(b) Présentation des Plans XZ à analyser du tissu NCS-2



(c) Présentation des Plans YZ à analyser du tissu NCS-2

Figure 5.8: Présentation des plans XZ (b) et YZ (c) de polissage permettant d'analyser section par section le tissu NCS-2 (a)

de remarquer que les itérations des plans de coupe sont espacées d'environ $225\mu\text{m}$ pour un total de 13 plans. Pour ce qui est de la figure 5.8b, les espacements sont quant à eux de $150\mu\text{m}$.

La dernière étape de la procédure est la prise d'image. Celle-ci est effectuée à l'aide d'un microscope optique conventionnel équipé d'un système de capture d'image *CLEMEX*[78]. La résolution du microscope utilisée est de 25X. Il a été nécessaire d'utiliser une faible résolution de la sorte afin de diminuer le nombre d'images requises pour couvrir toute la surface des échantillons. Environ 25 à 45 images doivent être capturées par plan de coupe pour des tissus d'épaisseur variant de 4mm à 11mm. Ces images sont par la suite jointes ensemble.

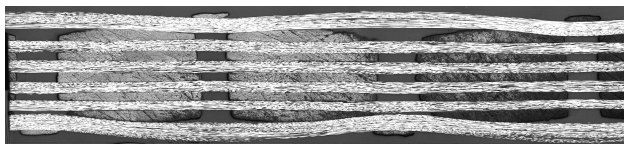
Le logiciel d'édition d'images *Photoshop* possède une fonction pour positionner automatiquement des images adjacentes. Toutefois, cette fonction n'est pas entièrement fiable. Une validation manuelle du positionnement de chaque image est nécessaire. De ce fait, la représentation d'une section créée par l'assemblage de plusieurs images peut engendrer des erreurs mais son ordre de grandeur est négligeable comparativement aux erreurs reliées à la fabrication de plaques composites d'épaisseur constantes. Suite à la présentation de la procédure de polissage et de prise d'images, il est maintenant possible de pouvoir comparer les images capturées avec des sections du tissu équivalentes modélisées.

5.4 Analyse de la mésostructure

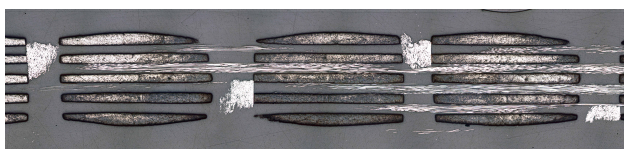
Le but de cette analyse est d'être en mesure d'évaluer la précision d'un modèle à sections constantes linéaires et de formes symétriques comparativement à des tissus 3D types réels. Parmi les six tissus fabriqués, les deux tissus ayant obtenu les meilleurs résultats de polissage sont présentés dans cette analyse, soit les tissus NCS-2 et le SERGÉ-3 présentés au chapitre 3. Cette analyse sera effectuée en deux parties. D'une part, les taux de fibres des fils deux types de tissus analysés seront mesurés et comparés au taux de fibres général du modèle de 70% [66–71]. D'une autre part, la comparaison des dimensions des fils, de l'espacement entre les fils et de l'épaisseur du tissu sera effectuée sur les deux classes de tissus 3D types pour différentes sections critiques.

5.4.1 Comparaison des taux de fibres

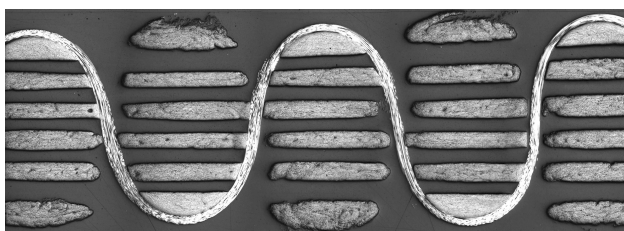
Tout d'abord, les sections critiques des deux tissus utilisées dans cette analyse sont présentées à la figure 5.9. Pour le tissu NCS-2, ces quatre sections ont été spécifiquement sélectionnées afin de faire ressortir les plus grandes variations de la géométrie des fils. Plus précisément, en regardant le plan de polissage de la figure 5.8, les sections YZ1 et XZ5 permettent de présenter des zones fortement influencées par le fil de liage et l'inverse pour les sections YZ9 et XZ13.



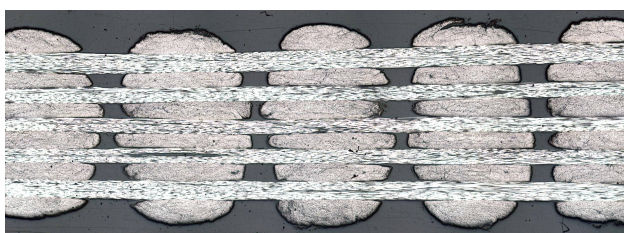
(a) Tissu NCS-2, section YZ1



(b) Tissu NCS-2, section YZ9



(c) Tissu NCS-2, section XZ5



(d) Tissu NCS-2, section XZ13



(e) Tissu SERGÉ-3, section YZ



(f) Tissu SERGÉ-3, section XZ

Figure 5.9: Présentation des sections utilisées pour l'analyse de la mésostructure des tissus

L'entièreté des sections intermédiaires polies pour ce tissu est présentée à l'annexe G. Pour le tissu SERGÉ-3, seule une itération par section est nécessaire puisque ce dernier possède une architecture symétrique avec des dimensions très peu variables dans sa profondeur. Aussi, l'architecture même du tissu avec une armure de type sergé rend très difficile de définir le positionnement spatial de la section à travers la profondeur de ce tissu très épais. Bref, ces sections de la figure 5.9 vont permettre de fournir une première validation de la précision du modèle développé et de son potentiel futur.

La première étape de cette validation est de déterminer le taux de fibres de chacun des fils. La procédure du laboratoire pour effectuer cette tâche consiste normalement à effectuer une analyse d'images afin de différencier les tons de couleur associés aux fibres et à la résine. Toutefois, cette approche est seulement précise si l'on a capturé des images à une résolution de 200X avec le microscope tel que présenté à la figure 5.10b. Sachant qu'une section de tissu NCS de 11 couches contient environ de 20 à 30 images jointes à une résolution de 25X et qu'un nombre minium d'environ 10 mesures de taux de fibres par type de fil est nécessaire, l'analyse à 200X demande de prendre un trop grand nombre d'images pour des tissus 3D de cette épaisseur.

La figure 5.10a permet de démontrer la différence de grandeur entre ces deux résolutions. Une différente technique de mesure a été adoptée, celle-ci nécessite de le calculer de l'aire de

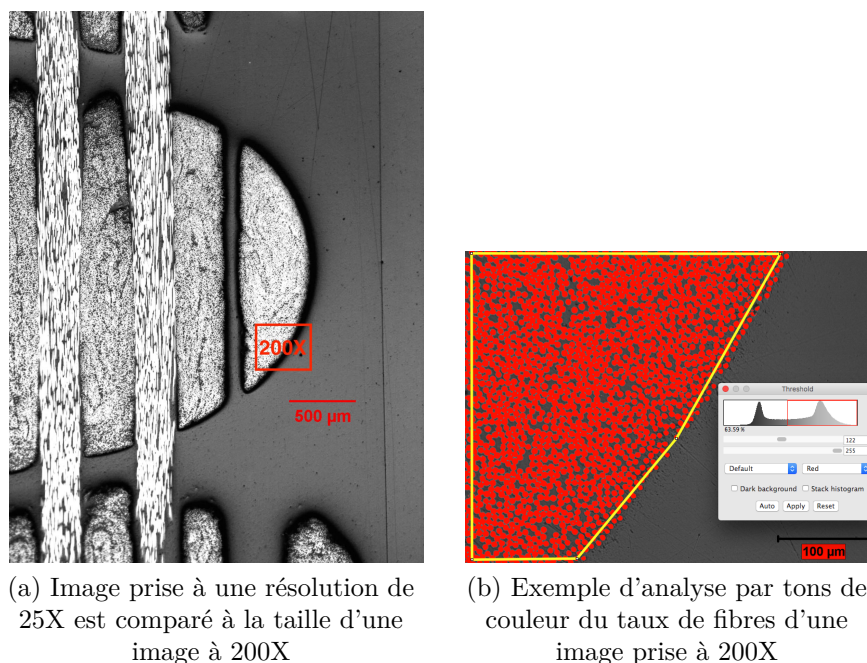
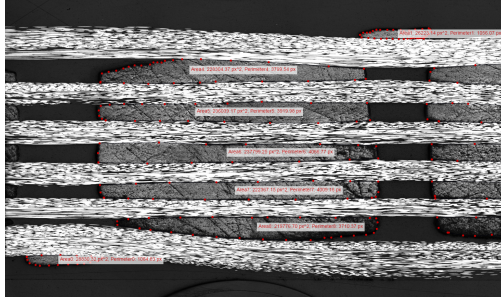


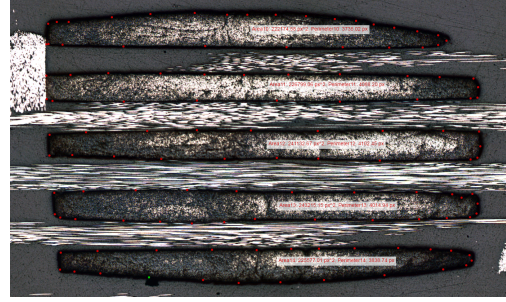
Figure 5.10: Comparaison d'une image à 25X et 200X d'une section XZ du tissu NCS-2

la section des fils. Cette valeur d'aire est obtenue en traçant un polygone formant le contour de la section d'un fil. Le tracé et le calcul d'aire à l'intérieur du polygone sont effectués à l'aide du logiciel d'analyse d'image WebPlotDigitizer [60]. Le calcul d'aire est donné en pixel carré, cette unité de mesure est par la suite convertie en mm^2 à l'aide d'axes de graduation.

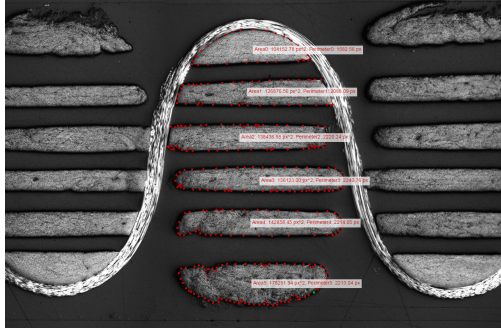
La figure 5.11 présente un aperçu des polygones tracés pour chaque type de fil. Pour le



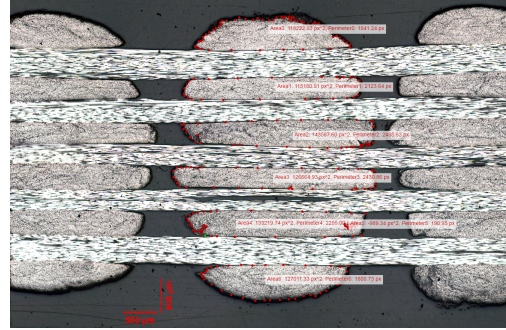
(a) Tissu NCS-2, section YZ1



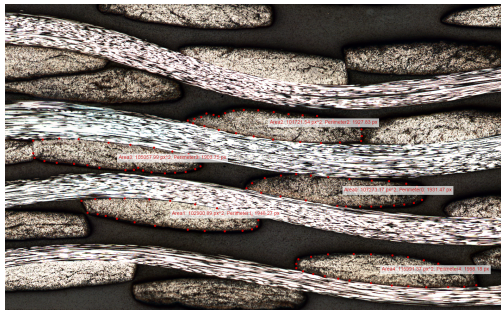
(b) Tissu NCS-2, section YZ9



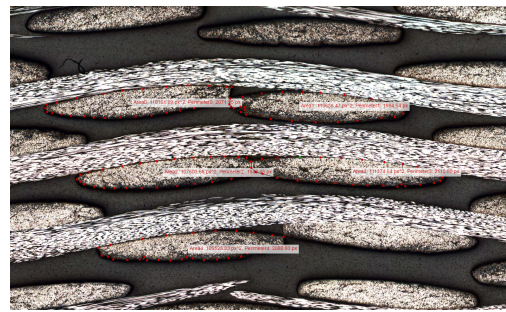
(c) Tissu NCS-2, section XZ5



(d) Tissu NCS-2, section XZ13



(e) Tissu SERGÉ-3, section YZ



(f) Tissu SERGÉ-3, section XZ

Figure 5.11: Présentation d'exemples de polygones tracés pour chacune des sections analysées

tissu NCS-2, 4 mesures d'aire des fils de liage, 30 mesures d'aire des fils bourreurs et 36 mesures d'aire des fils de trame ont été effectuées. Pour le tissu SERGÉ-3, 15 mesures d'aire

des fils de chaîne et de trame ont été effectuées. Suite à l'obtention de l'aire de tous les fils, leur taux de fibres est obtenu à l'aide du calcul déjà présenté à la figure 4.4. Toutes les valeurs de taux de fibres calculés des fils sont présentées à l'annexe H. D'ailleurs, les fils de carbone utilisés pour fabriquer tous les tissus sont le *Toho Tenax E-HTS40 F13 12k* pour les fils de chaînes et de trames et le *Toho Tenax J-HTS40 E13 3k* pour les fils de liages. De plus, tous les deux fils possèdent le même diamètre, soit de $7\mu\text{m}$. Les résultats des taux de fibres calculés sont présentés au tableau 5.2.

Tableau 5.2: Présentation des taux de fibres calculés à partir des sections critiques des tissus analysés

Tissu	Plan coupe	Taux de fibres min/max (%)			Taux de fibres moyen ± Écart-types (ET) (%)		
		chaîne(12K)	Trame(12K)	Liage(3K)	chaîne(12K)	Trame(12K)	Liage(3K)
NCS-2	YZ1	56,4/64,1	-	60,3/66,3	61±2	-	63±3
	YZ9	55,6/61,8	-	-	59±2	-	-
	XZ5	-	38,7/66,3	-	-	52±7	-
	XZ13	-	46,5/59,9	-	-	53±4	-
SERGÉ-3	YZ	59,2/67,5	-	-	64±2	-	-
	XZ	-	58,0/65,8	-	-	63±3	-

À première vue, les taux de fibres maximums (T_{fmax}) obtenus sont tous en dessous de la valeur de références du modèle, soit de 70%. Toutefois, en analysant davantage la fabrication des pièces composites de cette étude comparativement aux pièces composites renforcées par des tissus 3D dans la littérature, l'absence de compression des tissus fabriqués dans cette étude semble expliquer en grande partie cette divergence. Dans la littérature, les valeurs des taux de fibres présentés sont généralement calculées à partir d'une structure textile qui subit une certaine compression de son épaisseur. Pour les tissus étudiés, c'est la structure relaxée libre que l'on tente de modéliser. Une analyse du tissu NCS-2 et SERGÉ-3 tissu est présentée.

Tissu de type NCS

Les fils de chaîne droits du tissu NCS-2, soit les fils bourreurs, possèdent des taux de fibres moyens (T_{fmo}) très similaires entre les deux sections YZ analysées. Les fils bourreurs de la section YZ1 (figure 5.9a) possèdent un T_{fmo} de 61% et la section YZ9 (figure 5.9b) de 59% pour ces types fils. La même tendance est aussi observée lorsqu'on compare les T_{fmin}/T_{fmax}

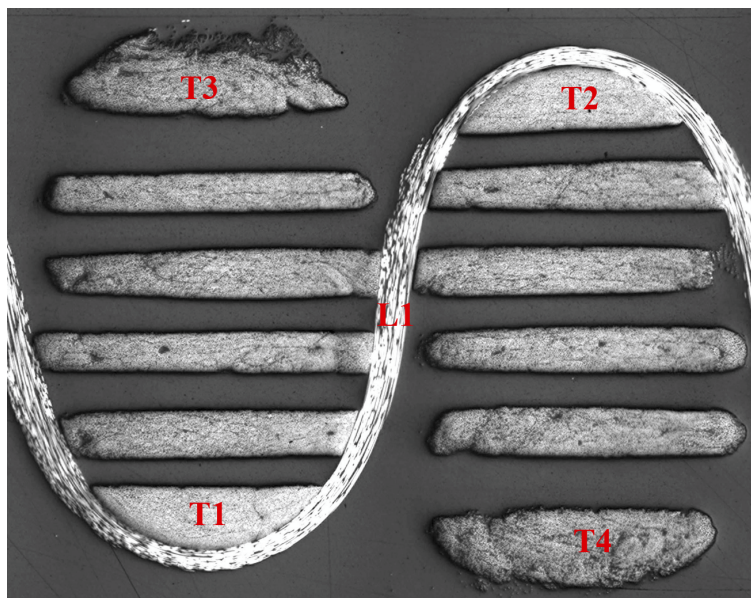


Figure 5.12: Présentation de l'influence du fil de liage sur le taux de fibres des fils de trame de la section XZ5

des sections YZ1 (56,4%/64,1%) et YZ9 (55,6%/61,8%). Cette différence peut être attribuée au positionnement du fil de liage qui vient compresser les fils bourreurs dans la section YZ1 seulement. Plus le fil bourreur est situé près du fil de liage, plus la forme du fil se voit déformée. Pour la section YZ9, cette influence de pression du fil de liage est moins marquée. De ce fait, une plus grande variation entre la valeur maximale et minimale est observée dans cette section YZ1, soit de 7,7% contre 6,2% pour la section YZ9. De plus, cette pression appliquée engendre une ondulation visible, à la figure 5.9a, des fils de trame en contact avec le fil de liage. D'ailleurs, le $T_{f\text{moy}}$ de 63% du fil de liage est le résultat le plus élevé qui a été obtenu pour ce tissu. Ce $T_{f\text{moy}}$ élevé du fil de liage est attribué à sa tension supérieure comparativement autres types de fils de ce tissu.

Pour ce qui est des fils de trame, ceux-ci possèdent de $T_{f\text{moy}}$ similaire, soit de 52% pour la section XZ5 et 53% pour la section XZ13. De plus, ces $T_{f\text{moy}}$ présentent les plus grands ET, soit de 7% pour la section XZ5 et de 4% pour la section XZ13. En regardant plus en détail la figure 5.12, il est possible de constater que les taux de fibres des trames T1 (64,0%) et T2 (66,3%) qui se retrouvent contournées par un fil de liage L1 sont nettement plus compressées que les trames opposées T3(44,4%) et T4(38,7%). La seconde section qui est présentée la figure 5.9d, est quant à elle peut influencée par l'emprise du fil de liage, ce qui explique aussi sa valeur inférieure de son écart-type, soit de 4%.

Pour terminer cette analyse du tissu NCS-2, il semble être possible de constater que l'utilisation d'un modèle ayant des fils à section constante permet de donner une approximation acceptable de l'allure moyenne d'un tissu de type NCS étant donné que les valeurs de $T_{f\text{moy}}$ obtenus par fil possèdent un écart égal ou inférieur à 2%. Toutefois, cette approche néglige tout de même les variations locales du tissu.

Tissu de type SERGÉ

En ce qui a trait au tissu SERGÉ-3, les valeurs des $T_{f\text{moy}}$ obtenus sont supérieures à celles du NCS-2. Son architecture compacte, symétrique et son grand nombre de liages semblent être tous des facteurs qui ont permis d'obtenir des $T_{f\text{moy}}$ de 64% pour les fils de chaîne et 63% pour les fils de trame. Il en est de même avec les valeurs minimum et maximum qui sont supérieures aux fils de chaîne et de trame du tissu NCS-2. Seul le fil de liage du tissu NCS-2 possède des valeurs de taux similaire. Il n'est pas surprenant d'obtenir cette similitude étant donné que le parcours du fil de liage du tissu NCS-2 et les parcours des fils du tissu SERGÉ ont tous une trajectoire ondulatoire.

Ensuite, sachant que la longueur de l'avance et l'espacement du peigne du tissu SERGÉ-3 sont les mêmes, il est surprenant de remarquer que les $T_{f\text{min}}$ et $T_{f\text{max}}$ des fils de chaîne sont supérieurs aux $T_{f\text{min}}$ et $T_{f\text{max}}$ des fils de trame. Une explication possible de cette différence pourrait être due à la différence de tension dans les fils lors de la fabrication. Généralement, la tension dans les fils de chaîne est supérieure à celle en trame. Le parcours des fils de chaîne, qui est présentée au chapitre 3, génère une plus grande résistance à la traction que le mécanisme d'insertion des trames. Le mécanisme de lance utilisé génère très peu de tension dans les fils de trame.

De plus, durant tout le processus de fabrication, les extrémités des fils de trame sont libres tandis que les extrémités des chaînes sont soutenues par la table de traction et par une bobine de fil sous tension. Toutefois, lors de la découpe du tissu après sa fabrication, toutes les extrémités des fils se retrouvent libres et un rééquilibrage de la structure pourrait avoir lieu. Aucune analyse n'a encore été effectuée sur ce sujet. Néanmoins, les taux de fibre obtenus permettent de conclure que le modèle développé avec un taux de fibre des fils de 70% semble être à première vue plus réaliste pour ce tissu SERGÉ que pour le tissu NCS-2.

Pour terminer cette première comparaison sur les taux de fibres des fils des tissus NCS et SERGÉ, ces données et ces premières analyses vont permettre de guider la suite de la comparaison du modèle, soit la comparaison des dimensions géométrique.

5.4.2 Comparaison des dimensions géométriques

Avant de débiter cette comparaison, il est nécessaire rappeler de quelle façon les spécifications des tissus modélisés ont été définies. Tout d'abord, pour ce qui est de la largeur des fils, celle-ci provient de la mesure effectuée en surface du tissu présenté au chapitre 3. Ensuite, la définition des exposants n et m des sections des fils modélisés provient du tableau 4.4. Les valeurs d'espacements entre les fils proviennent directement des paramètres de fabrication propres à chaque tissu. La définition des sections est de 88 points afin d'obtenir une erreur de calcul d'aire inférieure à 0,1% tel que présenté au chapitre 4.

Finalement, deux tissus modélisés avec différents taux de fibres seront présentés pour chaque tissu. Initialement, les tissus modélisés devaient avoir un taux de fibre par fil fixe à 70%. Toutefois, étant donnée la grande divergence de celle-ci avec les résultats obtenus du tableau 5.2, l'ajout de tissus modélisés ajustés aux taux de fibres mesurés au tableau 5.2 fut nécessaire pour continuer l'analyse. Il est à noter que le tissu NCS-2 avec les taux de fibres réels n'a pas pu être modélisé avec un ratio de tension de 2 comme le modèle de 70%, mais plutôt de 1.5. Cette modification permet d'assurer le passage du fil de trame entre le fil de liage et de chaîne sans interférence. L'analyse de cette modification sera ainsi analysé dans la prochaine section.

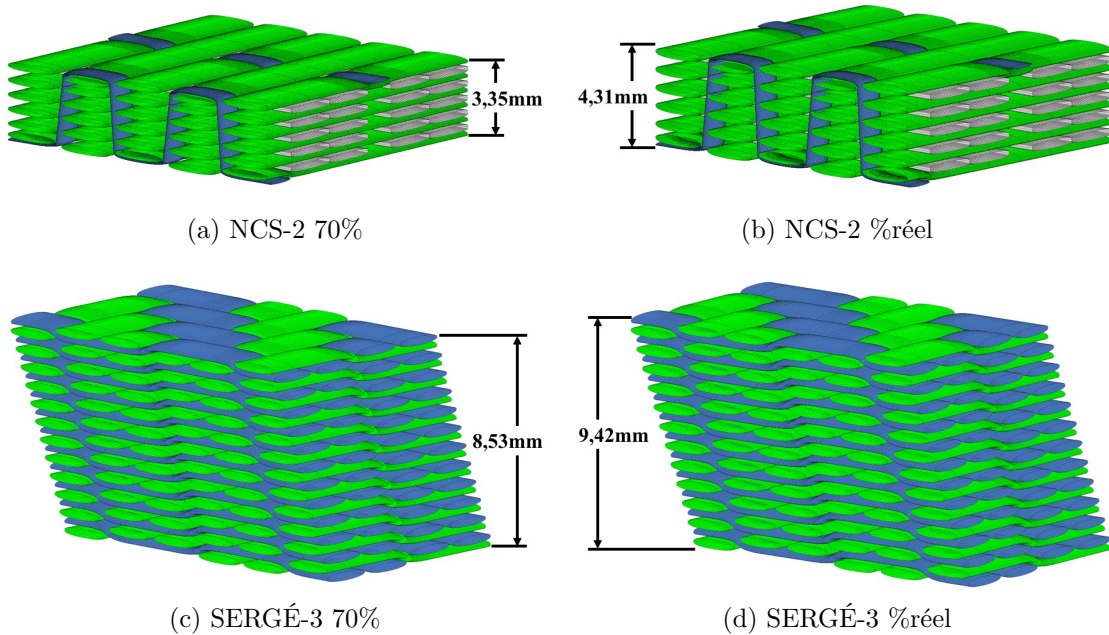


Figure 5.13: Présentation de la vue isométrique des tissus NCS-2 modélisés avec un taux de fibres de 70% (a) et avec un % réel (b) et des tissus SERGÉ-3 à 70% (c) et au % réel (d)

Les prises de mesure des dimensions des tissus réels ont été une fois de plus recueillies à l'aide du logiciel WebPlotDigitizer [60]. La figure 5.13 présente les quatre différents modèles 3D des tissus analysés.

Tissu NCS

Les tableaux 5.3 et 5.4 présente les données permettant d'effectuer la comparaison géométrique entre les tissus modélisés et celui réel. Tout d'abord, les deux versions modélisées possèdent les mêmes largeurs de fils et espacements. Toutefois, la hauteur de leurs fils n'est plus la même. En utilisant les taux de fibres du tableau 5.2 pour chacun des différents types de fils, l'épaisseur bondit de 3,35mm à 4,31mm. Cette valeur d'épaisseur basée sur des taux de fibres réels permet de se rapprocher significativement des valeurs mesurées de 4,28mm pour la section YZ1, de 4,44mm de la section XZ5 et de 4,2mm de la section XZ13.

Tableau 5.3: Comparaison des dimensions globales du tissu NCS-2

Tissu NCS-2 (Taux fibres)	Exposants superellipse						Espacements des fils ±Écart-types (mm)		Épaisseur du tissu ±Écart-types (mm)
	Chaînes		Trames		Liages		Chaînes (Peigne)	Trames (Avance)	
	(m)	(n)	(m)	(n)	(m)	(n)			
Modélisé (70%)	1	0,3	0,8	0,8	1	1	3,175	2,856	3,35
Modélisé (% réel)									4.31
Sections réelles du tissu NCS-2									
Réel YZ1							3,20±0,07	-	4,28±0,06
Réel YZ9							3,2±0,1	-	-
Réel XZ5							-	2,9±0,1	4,44±0,09
Réel XZ13							-	2,94±0,08	4,2±0,1

Ensuite, pour ce qui est de la mesure de largeur des tissus, on remarque que la largeur des fils de chaîne pour les deux sections YZ1 (2.51mm) et YZ9 (2.52mm) est largement supérieure à la valeur de 2.24mm du tissu modélisé. La valeur des tissus modélisés a été obtenue en mesurant la largeur du fil de chaîne situé à la surface.

De ce fait, sur la figure 5.9a, il est possible de remarquer que la largeur des fils de chaîne situés près des deux fils de liage est nettement inférieur que le restant des fils. Une procédure plus

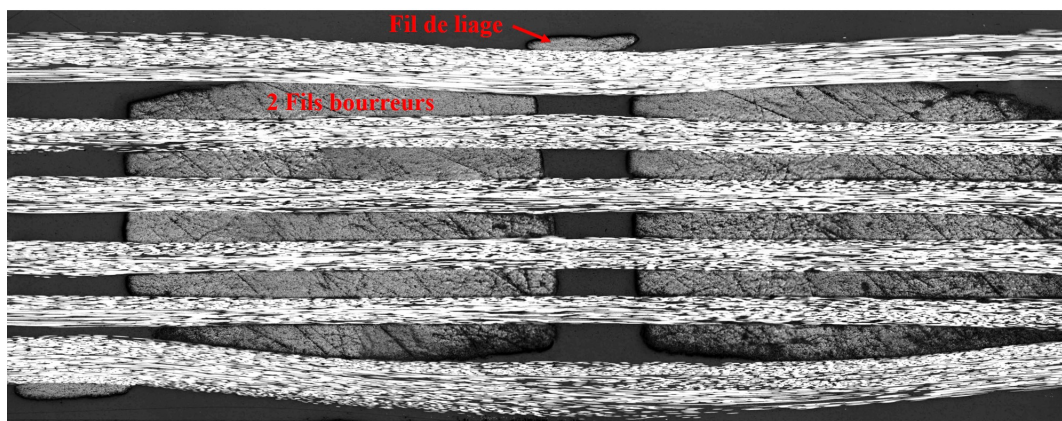
rigoureuse de mesure de la largeur des fils devra être mise en place pour tenter de corriger cette variation de la largeur des fils, soit d'effectuer la mesure des fils de chaîne située en dessous de la surface du tissu.

Tableau 5.4: Comparaison des dimensions externes des fils du tissu NCS-2

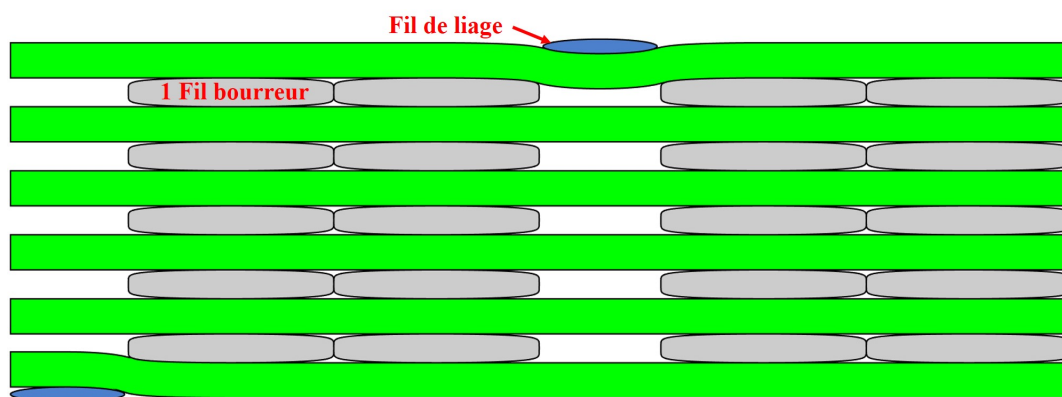
Tissu NCS-2 (Taux fibres)	Largeurs des fils \pm Écart-Types (mm)			Hauteur des fils \pm Écart-Types (mm)		
	Chaînes	Trames	Liage	Chaînes	Trames	Liages
Modélisé (70%)	2,24	2.49	1,36	0,30	0,31	0,15
Modélisé (% réel)	2,24	2.49	1,36	0,34	0,42	0,17
Sections réelles du tissu NCS-2						
Réel YZ1	2,51 \pm 0,08	-	1,35 \pm 0,06	0,37 \pm 0,06	0,41 \pm 0,09	0,18 \pm 0,03
Réel YZ9	2,52 \pm 0,08	-	1,15 \pm 0,07	0,37 \pm 0,04	-	-
Réel XZ5	-	2,4 \pm 0,3	-	-	0,44 \pm 0,09	0,16 \pm 0,01
Réel XZ13	-	2,4 \pm 0,3	-	0,34 \pm 0,05	0,42 \pm 0,09	-

Une seconde divergence est observée à la section YZ9 pour le fil de liage. Ce dernier, qui se retrouve au milieu du tissu à cette section, voit sa largeur compressée par les bourreurs adjacents de 0,2 mm.

Finalement, au niveau de la hauteur des fils, seuls les fils de chaînes présentent des différences de hauteur notable. La hauteur des fils de chaîne modélisés est inférieure à la hauteur réelle malgré que leur largeur est aussi inférieure. Une comparaison de la section YZ1 avec la section équivalente du tissu modélisé est présentée à la figure 5.14 pour comparer les sections des fils de chaîne.



(a) Section YZ #1 réelle du tissu

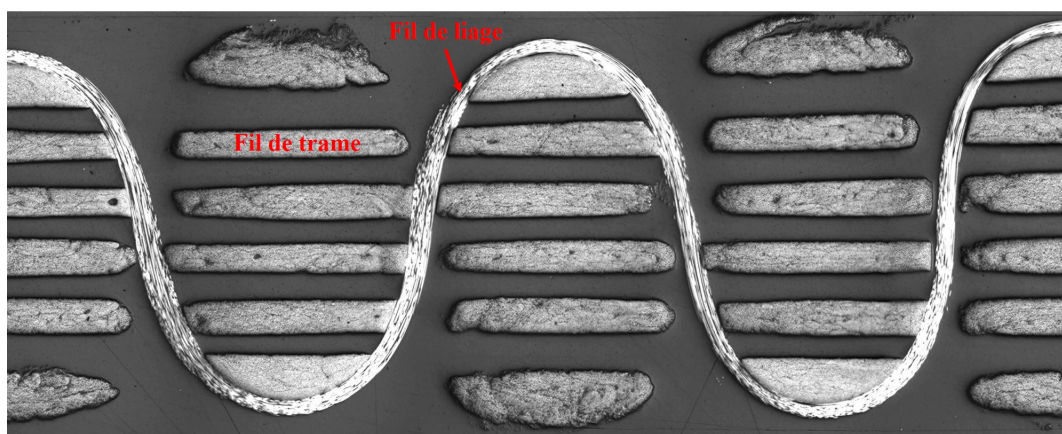


(b) Section YZ #1 modélisée du tissu

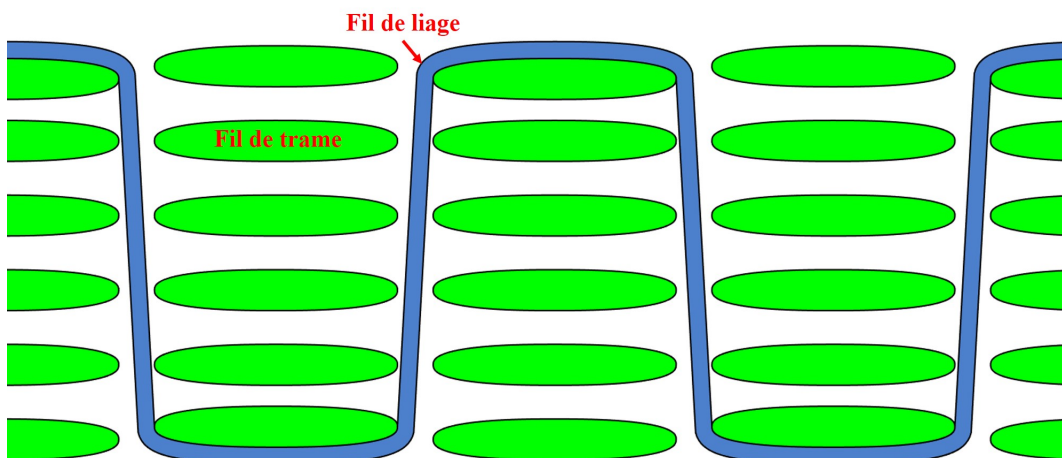
Figure 5.14: Comparaison du plan de coupe YZ1 du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux

À première vue, sur la figure 5.14 il est possible de constater que l'espacement du peigne est équivalent pour les deux sections. Malgré ce constat il existe tout de même des différences notables. La principale différence notable est la forme de section des fils de chaînes. Les fils bourreurs et liage la figure 5.14a possèdent une forme nettement plus raffinée dans les quatre quadrants que ceux de la figure 5.14b. La forme est à un point raffinée que la jonction entre les fils de chaîne adjacents n'est pas visible. Une définition par quadrant serait nécessaire pour améliorer la précision des fils bourreurs modélisés. Ainsi, les fils de chaînes du tissu réel possèdent en moyenne une hauteur maximale supérieure aux tissus modélisés étant donné l'influence des fils de liage qui viennent diminuer la hauteur des extrémités de ceux-ci. Cette diminution aux extrémités condense les fibres vers le milieu de la section, ce qui engendre une augmentation de leur hauteur maximale.

Ensuite, on remarque à la figure 5.15 que le tissu réel possède des sections de fils nettement plus définies, soit des formes de sections variables dans la profondeur du tissu, que les sections constantes du tissu modélisé. Toutefois, dans le cas du plan de coupe XZ5, la forme des fils de trame n'a pratiquement aucun impact sur les dimensions externes du tissu NCS-2 analysé. Un impact notable est observé sur la longueur du fil de liage. Cette différence est causée par les sections des fils de trame qui sont nettement plus raffinés sur le tissu réel 5.15a que celui modélisé 5.15b. Avec une longueur du paramètre d'avance inférieure à celle qui est présentée, il serait dans ce cas possible que cette épaisseur en soit influencée. Alors, cet aspect ne doit pas être entièrement négligé lors d'analyses futures.



(a) Section XZ #5 réelle du tissu



(b) Section XZ #5 modélisée du tissu

Figure 5.15: Comparaison du plan de coupe XZ5 du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux

Pour terminer la comparaison du tissu NCS-2, il est possible d'affirmer qu'un modèle à section constante pour ce type de tissu procure une précision acceptable puisque les dimensions des fils de ce type de tissu varient peu. Une variation de la forme des sections des fils de chaîne et de trame à travers la profondeur est fortement suggérée afin d'améliorer le réalisme visuel du modèle.

Tissu SERGÉ

Avant de commencer la dernière section de cette analyse géométrique, il est nécessaire de spécifier certaines particularités du tissu analysé. D'une part, ce tissu de type SERGÉ est considéré comme un tissu 3D interlock couche à couche étant donné la présence de liages intercouches. Toutefois, ce liage est peu récurant dans ce tissu. On retrouve une densité d'un liage couche à couche pour une zone de 16 trames par 16 chaînes pour chacune des couches du tissu.

D'une autre part, la version modélisée du tissu ne comporte pas de liage intercouche puisqu'aucun ouvrage dans la littérature ne traitait de ce liage pour ce type de tissu. Ainsi, l'influence de ce liage sur la mésostructure du tissu est présentée dans cette section.

Tableau 5.5: Comparaison des dimensions externes des fils du tissu SERGÉ-3

Tissu SERGÉ-3 (Taux fibre)	Largeurs des fils \pm Écart-Types (mm)		Hauteur des fils \pm Écart-Types (mm)	
	Chaîne	Trames	Chaînes	Trames
Sections réelles du tissu SERGÉ-3				
Modélisé (70%)	2,19	2,20	0,36	0,36
Modélisé (% réel)	2,19	2,20	0,39	0,40
Réel YZ	-	2,42 \pm 0,08	-	0,39 \pm 0,03
Réel XZ	2,5 \pm 0,1	-	0,37 \pm 0,02	-

Tableau 5.6: Comparaison des dimensions globales du tissu SERGÉ-3

Tissu SERGÉ-3 (Taux fibre)	Exposants superellipse				Espacements des fils ±Écart-Types (mm)		Épaisseur du tissu ±Écart-Types (mm)
	(m)		(n)		Chaînes (Peigne)	Trames (Avance)	
	Chaînes	Trames	Chaînes	Trames			
Sections réelles du tissu SERGÉ-3							
Modélisé (70%)	0,8	0,8	0,8	0,8	2,50	2,50	8,53
Modélisé (% réel)	0,8	0,8	0,8	0,8	2,50	2,50	9,42
Réel YZ					-	2,5±0,2	11,2±0,1
Réel XZ					2,6±0,1	-	11,20±0,05

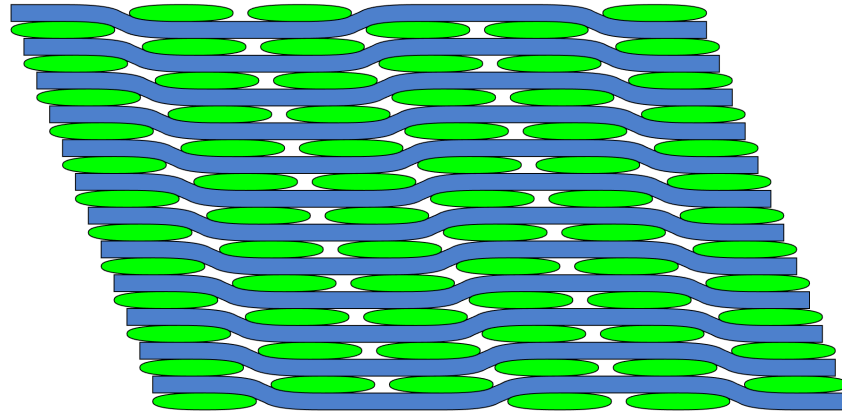
Les tableaux 5.5 et 5.6 présentent les dimensions critiques du tissu SERGÉ-3 analysées. La première comparaison marquante est la largeur des fils modélisés qui sont inférieurs à ceux mesurés sur les deux sections du tissu réel. En fait, les mesures initiales du tableau 3.2, qui ont été effectuées sur le dessus du tissu, sont très similaires à celles mesurées aux sections YZ et XZ.

Toutefois, afin de permettre un espacement suffisant pour le passage des fils entre eux, la diminution de la largeur des deux types de fils fut nécessaire pour éviter d’obtenir des interférences entre les fils. Pour pallier efficacement à cette source d’erreur majeure, une rotation des sections des deux types de fils doit être implémentée afin de faciliter le passage des fils sans interférence, peu importe la largeur des fils. Ce comportement de rotation des sections des fils peut être observé aux figures 5.9e et 5.9f.

La seconde différence marquante est l’épaisseur des tissus. La comparaison des sections à la figure 5.16 est nécessaire pour mieux analyser ces variations. Tout d’abord, l’analyse d’un tissu possédant une grande épaisseur et un angle de décalage dans ses deux directions, comme celui à la figure 5.16a, rend difficile de retrouver une constance dans sa mésostructure. La première différence visuelle marquante entre les deux sections à la figure 5.16 est l’ondulation des trames. Celle-ci permet de faire passer les fils de chaînes directement entre deux trames sans devoir les contourner. L’ajout de cette nouveauté au modèle permettrait de limiter les interférences entre les fils, peu importe leurs largeurs.



(a) Section XZ réelle du tissu



(b) Section XZ modélisée du tissu avec un angle de décalage des trames de 22,5%

Figure 5.16: Comparaison du plan de coupe XZ du tissu réel et modélisé avec des taux de fibres égaux

Ensuite, en continuant de comparer la section réelle et modélisée, il est possible de remarquer à la figure 5.16a un plus grand espacement vertical entre les fils qu'à la figure 5.16b. Ce constat peut être causé par une architecture plus désordonnée que celle du modèle qui est parfaitement ordonnée. De plus, le fait d'avoir négligé le liage intercouche pour le tissu modélisé peut être un autre facteur qui vient influencer les espacements verticaux. De ce fait, un liage couche à couche est présenté à la section XZ de la figure 5.17.

À la figure 5.17, le fil de liage, identifié C1, vient lier deux couches ensemble en emprisonnant la Trame T1 avec les trames T2 et T3 formant ainsi une configuration triangulaire.

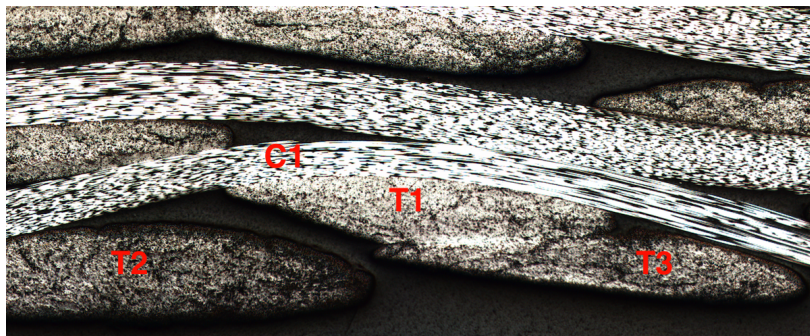


Figure 5.17: Présentation du liage intercouche permettant de relier deux couches ensemble du tissu 3D SERGÉ-3

La représentation de cette configuration dans le modèle numérique n'est pas actuellement possible. Des modifications au modèle doivent être appliquées pour améliorer la simulation de cette réalité. Plus précisément, la trajectoire du fil de liage doit être modifiée afin de le faire dévier hors plan. L'ajout d'un deuxième angle variable à la fonction *Rotation* du modèle permettrait contrôler la trajectoire de tous les fils du tissu de reproduire cette observation. Cependant, une analyse approfondie sur plusieurs types de tissu possédant un liage couche à couche doit être effectuée pour être en mesure de bien définir la trajectoire de ce type de liage. Finalement, l'analyse d'un tissu ACC est nettement plus complexe que l'analyse des tissus NCS. C'est pourquoi, au stade de développement du modèle actuel, seules deux sections ont été présentées afin de donner un aperçu des divergences du modèle avec la réalité.

5.5 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, une validation du modèle présenté au chapitre 4 a été effectuée. Toutes les étapes permettant d'effectuer une comparaison du modèle avec des tissus réels ont été présentées. Tout d'abord, la fabrication des plaques composites renforcée par des tissus 3D est présentée. Ensuite, l'approche de polissage des tissus a été détaillée. Finalement, une analyse comparative de la mésostructure du modèle et de deux tissus types a été effectuée. Cette analyse a permis de conclure que le modèle développé permet de modéliser un tissu NCS-2, soit un tissu OTP, ayant une géométrie similaire à la réalité. Pour ce qui est de l'analyse du tissu SERGÉ-3 (ACC), le modèle requiert des améliorations pour obtenir des résultats comparables à la réalité. Ces améliorations sont la rotation des sections des fils de ce tissu ACC et de l'implémentation du liage couche à couche dans le modèle.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse du développement d'un outil de simulation

Le développement d'un outil de simulation pour la conception de préformes par tissage 3D a été réalisé. Ce mémoire présente le développement de cet outil en trois objectifs. Premièrement, la fabrication et une caractérisation préliminaire de tissus 3D interlock ont été effectuées. Les sous-systèmes du métier à tisser numérique utilisé dans ce projet et leurs fonctionnements ont été présentés. Une analyse de ce procédé a fait ressortir des paramètres critiques de fabrication qui influence la géométrie des tissus. La corrélation de leurs influences a été analysée à l'aide d'une caractérisation préliminaire. Il en est ressorti que les deux paramètres critiques, soit l'avance du tissu et l'espacement du peigne, ont des influences directes sur les dimensions des fils des tissus analysés.

Deuxièmement, le développement d'un modèle géométrique est présenté. Ce dernier a été conçu afin de respecter les requis du partenaire industriel, le GroupeCTT. Le modèle présenté se base principalement sur les données d'entrées fournies par le logiciel de fabrication EasyJC. Ce dernier fournit automatiquement l'architecture et le titrage des fils du tissu à modéliser. Les sections du modèle sont réalisées à l'aide d'une fonction elliptique généralisée spécifiquement développée, soit une superellipse. La trajectoire des fils est basée sur le principe de corde sous tension. La définition des points centraux intermédiaires lors d'un liage est exécutée à l'aide d'un algorithme se basant sur les dimensions des sections de fils à contourner. Cette technique permet d'éviter les d'interpénétration des fils en interaction lors d'un liage. Un principe similaire a été implémenté pour l'ondulation des trames lorsque le ratio de tension des fils est non nul. Le modèle 3D du tissu modélisé est finalement généré sous forme de fichier *STL*.

Troisièmement, la validation de cette approche de modélisation développée a été effectuée sur un tissu OTP de type NCS et un tissu à ACC possédant une armure de type SERGÉ. Tout d'abord, les travaux liés au développement du procédé de fabrication de plaques composites ont été présentés. Il a été démontré que le développement d'un procédé spécifique pour fabriquer des plaques composites à renforts 3D est critique afin de produire des plaques à épaisseur constante et sans porosité. Ensuite, la procédure de polissage effectué pour les deux tissus à analyser a permis d'obtenir plusieurs images des sections critiques des tissus. Finalement, ces sections ont ainsi été analysées en deux parties. D'une part, l'analyse du taux

de fibre des fils a permis de comparer les valeurs des tissus modélisés et celles des tissus réels. Il en est ressorti que les taux de fibres des tissus réels sont tous en dessous de la valeur initiale du modèle, soit de 70%. D'une autre part, une comparaison géométrique a été effectuée entre les tissus modélisés et réels. Le taux de fibre des tissus modélisés a été ajusté avec les valeurs obtenues de la première analyse. De ce fait, la largeur des fils et l'épaisseur du tissu NCS modélisé sont toutes similaires aux valeurs réelles, soit de 11% d'écart pour la largeur des fils de chaînes, 4% d'écart pour la largeur des fils de trame, 8% de la largeur des fils de liage et 0,2% d'écart pour la valeur d'épaisseur moyenne. Le modèle a ainsi la capacité de reproduire rapidement un tissu NCS avec des dimensions près de la réalité. Pour ce qui est du tissu couche à couche SERGÉ, de plus grandes divergences ont été observées. Actuellement, ce modèle ne peut reproduire un tissu de ce type similaire à la réalité, soit de 14% d'écart pour la largeur des fils de chaînes, 10% d'écart pour la largeur des fils de trame et 19% d'écart pour la valeur d'épaisseur moyenne. Il en reste qu'avec des observations supplémentaires le modèle peut être adapté pour reproduire adéquatement ces tissus.

6.2 Limitations du modèle proposé

Un retour sur les limitations de l'approche de modélisation développée est effectué. Le requis d'automatisation de l'approche développé engendre des limitations. Le modèle développé doit supposer des sections constantes afin d'automatiser la génération d'un modèle 3D. L'implémentation de la variation des sections des fils le long de leur trajectoire demande d'effectuer davantage de caractérisation des tissus. Le manque de caractérisation actuel est ce qui limite malheureusement le modèle.

Ensuite, certaines architectures complexes peuvent engendrer une erreur dans le code *MATLAB* et ainsi générer un modèle avec un défaut. Une fois de plus, avec davantage de caractérisation des tissus, il sera possible d'améliorer considérablement la robustesse du modèle à modéliser tout type de tissu 3D.

L'application des tendances observées sur la relation entre la largeur des fils et les valeurs des paramètres de fabrications du tableau 3.2 restent à être validés sur de nouveaux tissus. Avec une nouvelle analyse de la sorte, un verdict sur l'automatisation du modèle pourra être effectué. De ce fait, cette analyse permettra d'indiquer s'il existe des tendances répétables entre deux tissus de mêmes classes, mais fabriquées avec différents paramètres de fabrication. Pour conclure sur les limitations du modèle, le manque de caractérisation des tissus a un impact direct sur les capacités actuelles du modèle. Les améliorations futures à prioriser sont

présentées à la prochaine section.

6.3 Améliorations futures de la modélisation des tissus 3D

Pour conclure ce projet, l'objectif principal de développer un outil de simulation pour la conception de préforme par tissage 3D a été réalisé. De plus, le modèle géométrique développé permet de répondre en grande partie au besoin du partenaire de prédire rapidement et facilement les dimensions de leurs tissus 3D à la sortie du métier à tisser. Un raffinement de ce dernier reste à être amélioré pour être en mesure de reproduire rapidement tous types de structure sans nécessité de passer par une caractérisation du tissu. Il existe plusieurs améliorations possibles, toutefois, les plus critiques sont les suivantes.

1. Tissus OCC et OTP : Implémenter des formes de sections non symétriques (utiliser la définition par quadrant déjà implémentée)
 - (a) La forme des sections des fils de trame doit être variable en fonction de leur positionnement dans le tissu
 - (b) La forme des sections des fils bourreurs doit être davantage influencée par la pression exercée par le fil de liage adjacent.
2. Tissus ACC et ATP : ajout de fonctions au modèle
 - (a) Rotation des sections afin de faciliter le passage des fils et briser la structure organisée du modèle actuel
 - (b) Implémentation du liage couche à couche sous forme de configuration triangulaire

Il est certain que ces améliorations ne sont pas les seules possibles à réaliser. Par exemple, une analyse approfondie sur la variabilité des différentes architectures des tissus 3D devrait être effectuée à la suite des améliorations qui ont été suggérées. Néanmoins, pour parvenir à améliorer le modèle, davantage de données sur la structure des tissus 3D doivent être recueillies. De ce fait, plusieurs techniques pour recueillir ce type d'informations peuvent être utilisées. D'une part, d'autres analyses d'images par microscopie ou microtomographie sont des approches permettant de comparer le modèle avec la réalité. D'une autre part, une modélisation de la structure relaxée des tissus 3D à l'aide de logiciel d'éléments finis pourrait être effectuée afin d'offrir une différente approche de validation du modèle géométrique réalisé.

Pour terminer, malgré la popularité émergente des renforts 3D tissés, il en a encore beaucoup à apprendre sur la modélisation de ces tissus possédant un nombre inestimable de configurations possibles. Le potentiel initial de cette nouvelle approche de modélisation géométrique a été mis de l'avant dans ce projet.

RÉFÉRENCES

- [1] J. A. Cichosz, “Experimental characterization and numerical modeling of the mechanical response for biaxial braided composites,” Dissertation, Technical University of Munich, Munich, GE, 2015.
- [2] A. P. Mouritz, M. K. Bannister, P. J. Falzon, et K. H. Leong, “Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 12, pp. 1445–1461, 1999. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X99000342>
- [3] A. P. Mouritz, *6 - Three-dimensional (3D) fibre reinforcements for composites A2 - Boisse, Philippe*. Woodhead Publishing, 2011, pp. 157–199. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845699659500062>
- [4] SAFRAN, “LEAP,” Novembre 2018. En ligne : <https://www.safran-aircraft-engines.com/fr/moteurs-civils/avions-court-et-moyen-courriers/leap/leap>
- [5] B. N. Cox, “Handbook of analytical methods composites,” NASA, Report 4750, 1997. En ligne : <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970017583.pdf>
- [6] B. N. Cox, M. S. Dadkhah, W. L. Morris, et J. G. Flintoff, “Failure mechanisms of 3d woven composites in tension, compression, and bending,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 42, no. 12, pp. 3967–3984, 1994. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0956715194901740>
- [7] D. Coupé, *4 - Woven reinforcements for composites A2 - Boisse, Philippe*. Woodhead Publishing, 2011, pp. 89–115. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845699659500049>
- [8] F. Boussu, I. Cristian, et S. Nauman, “General definition of 3d warp interlock fabric architecture,” *Composites Part B : Engineering*, vol. 81, pp. 171–188, 2015. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815004230>
- [9] C. Mullen et P. Roy, “Fabrication and properties description of Avco 3D carbon–carbon cylindrical composites,” dans *SAMPE*, Los Angeles, California, USA, April 1972.
- [10] K. Bilisik, “Multiaxis three dimensional (3d) woven fabric,” dans *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*, S. Vassiliadis, éd. Rijeka : IntechOpen, 2011, ch. 5. En ligne : <https://doi.org/10.5772/16530>
- [11] K. Bilisik, N. S. Karaduman, et N. E. Bilisik, “3d fabrics for technical textile applications,” dans *Non-woven Fabrics*, H.-Y. Jeon, éd. Rijeka : IntechOpen, 2016, ch. 4. En ligne : <https://doi.org/10.5772/61224>

- [12] P. G. Unal, *3D Woven Fabrics*, série Woven Fabrics. Intech, 2012. En ligne : <http://www.intechopen.com/books/woven-fabrics/3-d-woven-fabrics>
- [13] N. Gokarneshan et R. Alagirusamy, “Weaving of 3d fabrics : a critical appreciation of the developments,” *Textile Progress*, vol. 41, no. 1, pp. 1–58, 2009. En ligne : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405160902804239>
- [14] B. Cox, M. Dadkhah, R. Inman, M. Mitchell, W. Morris, et S. Schroeder, “Micromechanics of fatigue in woven and stitched composites,” Rockwell International Science Center, Report, 1991.
- [15] B. N. Cox, M. S. Dadkhah, R. V. Inman, W. L. Morris, et J. Zupon, “Mechanisms of compressive failure in 3d composites,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 40, no. 12, pp. 3285–3298, 1992.
- [16] B. N. Cox, “Delamination and buckling in 3d composites,” *Journal of Composite Materials*, vol. 28, no. 12, pp. 1114–1126, 1993. En ligne : <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/002199839402801203>
- [17] B. N. Cox, W. C. Carter, et N. A. Fleck, “A binary model of textile composites—i. formulation,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 42, no. 10, pp. 3463–3479, 1994. En ligne : <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/61.pdf>
- [18] J. Xu, B. N. Cox, M. A. McGlockton, et W. C. Carter, “A binary model of textile composites—ii. the elastic regime,” *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 43, no. 9, pp. 3511–3524, 1995. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0956715195000573>
- [19] A. C. Long, B. J. Souter, F. Robitaille, et C. D. Rudd, “Effects of fibre architecture on deformation during preform manufacture,” *Advanced Composites Letters*, vol. 8, no. 6, pp. 333–344, 1999. En ligne : <http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap530.pdf>
- [20] F. Robitaille, A. C. Long, et C. D. Rudd, “Geometric modelling of textiles for prediction of composite processing and performance characteristics,” *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 31, no. 2, pp. 66–75, 2002. En ligne : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/146580102225001445>
- [21] F. Robitaille, A. C. Long, I. A. Jones, et C. D. Rudd, “Automatically generated geometric descriptions of textile and composite unit cells,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 4, pp. 303–312, 2003. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X03000630?via%3Dihub>

- [22] M. Sherburn, "Geometric and mechanical modelling of textiles," Dissertation, University of Nottingham, 2007. En ligne : <http://eprints.nottingham.ac.uk/10303/1/thesis-final.pdf>
- [23] H. Lin, X. Zeng, M. Sherburn, A. C. Long, et M. J. Clifford, "Automated geometric modelling of textile structures," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 16, pp. 1689–1702, 2011. En ligne : <http://dx.doi.org/10.1177/0040517511418562http://trj.sagepub.com/content/82/16/1689.full.pdf>
- [24] A. C. Long et L. P. Brown, *8 - Modelling the geometry of textile reinforcements for composites : TexGen*. University of nottingham, UK : Woodhead Publishing, 2011.
- [25] F. Gommer, L. P. Brown, et K. C. A. Wedgwood, "Analytical method using gamma functions for determining areas of power elliptical shapes for use in geometrical textile models," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 81, pp. 222–224, 2016. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X15004418>
- [26] L. P. Brown, X. Zeng, A. Long, et I. A. Jones, "Recent developments in the realistic geometric modelling of textile structures using TexGen," dans *1st International Conference on Digital Technologies for the Textile Industries*, Manchester, UK, september 2013.
- [27] C. R. Group, "Texgen (version 3.8.2)," 2016. En ligne : <http://texgen.sourceforge.net>
- [28] Y. Wang et X. Sun, "Digital-element simulation of textile processes," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 311–319, 2001. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353800002232>
- [29] G. Zhou, X. Sun, et Y. Wang, "Multi-chain digital element analysis in textile mechanics," *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 239–244, 2004. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353803002586>
- [30] Y. Miao, E. Zhou, Y. Wang, et B. A. Cheeseman, "Mechanics of textile composites : Micro-geometry," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 7-8, pp. 1671–1678, 2008. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380800047X>
- [31] L. Huang, Y. Wang, Y. Miao, D. Swenson, Y. Ma, et C.-F. Yen, "Dynamic relaxation approach with periodic boundary conditions in determining the 3-d woven textile micro-geometry," *Composite Structures*, vol. 106, pp. 417–425, 2013. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822313002821>
- [32] L. Huang, "Determining micro- and macro- geometry of fabric and fabric reinforced composites," Dissertation, KANSAS STATE UNIVERSITY, 2013.
- [33] X. Yang et Y. Wang, "Dynamic simulation of 3d weaving process," Dissertation, KANSAS STATE UNIVERSITY, 2015. En ligne : <https://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/18970/XiaoyanYang2015.pdf?sequence=1>

- [34] F. M. Group, “DEA Fabrics Mechanics Analyser (Version 0.5.1),” 2015. En ligne : <http://www.fabricmechanics.com>
- [35] S. V. Lomov, A. V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, et I. Verpoest, “Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 11, pp. 2083–2095, 2000. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353800001214?via%3Dihub>
- [36] S. V. Lomov, G. Huysmans, Y. Luo, R. S. Parnas, A. Prodromou, I. Verpoest, et F. R. Phelan, “Textile composites : Modelling strategies,” *Composites - Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 10, pp. 1379–1394, 2001. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X01000380?via%3Dihub>
- [37] I. Verpoest et S. V. Lomov, “Virtual textile composites software wisetex : Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis,” *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 15-16 SPEC. ISS., pp. 2563–2574, 2005. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380500196X>
- [38] S. V. Lomov, T. Mikolanda, M. Kosek, et I. Verpoest, “Model of internal geometry of textile fabrics : data structure and virtual reality implementation,” *Journal of the Textile Institute*, vol. 98, no. 1, pp. 1–13, 2007. En ligne : <http://dx.doi.org/10.1533/joti.2006.0251>
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1533/joti.2006.0251>
- [39] S. V. Lomov, G. Perie, D. Ivanov, I. Verpoest, et D. Marsal, “Modeling three-dimensional fabrics and three-dimensional reinforced composites : challenges and solutions,” *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 1, pp. 28–41, 2010.
- [40] S. V. Lomov, *7 - Modelling the geometry of textile reinforcements for composites : WiseTex A2 - Boisse, Philippe*. Woodhead Publishing, 2011, book section 7, pp. 200–238. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845699659500074>
- [41] C. M. Group, “Wisetex (version 3.2),” 2013. En ligne : <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>
- [42] G. Hivet et P. Boisse, “Consistent 3d geometrical model of fabric elementary cell. application to a meshing preprocessor for 3d finite element analysis,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 42, no. 1, pp. 25–49, 2005. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X05000600>
- [43] A. Wendling, G. Hivet, E. Vidal-Sallé, et P. Boisse, “Consistent geometrical modelling of interlock fabrics,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 90, pp. 93–105, 2014. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X14000936>

- [44] N. Isart, J. A. Mayugo, N. Blanco, L. Ripoll, A. Solà, et M. Soler, “Geometric model for 3d through-thickness orthogonal interlock composites,” *Composite Structures*, vol. 119, pp. 787–789, Janvier 2015.
- [45] N. Isart, B. El Said, D. S. Ivanov, S. R. Hallett, J. A. Mayugo, et N. Blanco, “Internal geometric modelling of 3d woven composites : A comparison between different approaches,” *Composite Structures*, vol. 132, pp. 1219–1230, 2015. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315005498>
- [46] Y. Mahadik et S. R. Hallett, “Finite element modelling of tow geometry in 3d woven fabrics,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 9, pp. 1192–1200, 2010. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X10001302>
- [47] —, “Effect of fabric compaction and yarn waviness on 3d woven composite compressive properties,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 11, pp. 1592–1600, 2011. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X11002120>
- [48] B. El Said, S. Green, et S. R. Hallett, “Kinematic modelling of 3d woven fabric deformation for structural scale features,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 57, pp. 95–107, 2014. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X13003059>
- [49] S. D. Green, A. C. Long, B. S. F. El Said, et S. R. Hallett, “Numerical modelling of 3d woven preform deformations,” *Composite Structures*, vol. 108, no. 1, pp. 747–756, 2014. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382231300528X>
- [50] S. D. Green, M. Y. Matveev, A. C. Long, D. Ivanov, et S. R. Hallett, “Mechanical modelling of 3d woven composites considering realistic unit cell geometry,” *Composite Structures*, vol. 118, pp. 284–293, 2014. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822314003146>
- [51] D. Durville, “Modélisation par éléments finis du comportement mécanique de structures textiles : de la fibre au tissu,” *Revue européenne des éléments finis*, vol. 11, no. 2-3-4, pp. 463–477, 2002.
- [52] —, “Modelling of contact-friction interactions in entangled fibrous materials,” dans *VI World Wide Congress on Computational Mechanics*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274117/document> <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274117/file/DurvilleContFrictEntangMater.pdf>, Conference Proceedings, p. CD. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274117>

- [53] —, “Approach of the constitutive material behaviour of textile composites through simulation,” dans *Structural Membranes 2005 II International conference on Textile Composites and Inflatable Structures*. CIMNE, Barcelona, 2005, Conference Proceedings, pp. 307–316. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274102>
- [54] —, “Finite element simulation of textile materials at mesoscopic scale,” dans *Finite element modelling of textiles and textile composites*, 2007, Conference Proceedings, p. CDROM. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274046>
- [55] —, “Prise en compte du contact-frottement au sein d’une assemblée à grand nombre de fibres pour l’identification du comportement mécanique de structures textiles,” dans *Huitième colloque national en Calcul des structures*, vol. 1. Hermes-Lavoisier, 2007, Conference Proceedings, pp. 307–312. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00274040>
- [56] —, *A Finite Element Approach of the Behaviour of Woven Materials at Microscopic Scale*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 39–46. En ligne : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00911-2_5
- [57] —, “Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers,” *International Journal of Material Forming*, vol. 3, no. 2, pp. 1241–1251, 2010. En ligne : <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0674-7>
- [58] —, “Simulation numérique du comportement de milieux fibreux enchevêtrés,” dans *10e colloque national en calcul des structures*, 2011, Conference Proceedings, p. Clé USB. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00592887>
- [59] R. Samadi et F. Robitaille, “Particle-based modeling of the compaction of fiber yarns and woven textiles,” *Textile Research Journal*, vol. 84, no. 11, pp. 1159–1173, 2014. En ligne : <http://trj.sagepub.com/content/84/11/1159.full.pdf>
- [60] A. Rohatgi, “WebPlotDigitizer (Version 4.1),” Janvier 2018. En ligne : <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- [61] J. Brazeau-Séguin, J. Levesque, et L. Laberge Lebel, “Développement d’une méthode de modélisation des tissus 3D par approche géométrique,” dans *11e Colloque annuel CREPEC*, Montreal, Décembre 2016.
- [62] J. Brazeau-Séguin, J. Levesque, et L. L. Lebel, “Relating weaving parameters and 3D woven fabric design with a geometrical modelling approach,” dans *ACM3*, Montreal, Avril 2017.
- [63] J. Brazeau-Séguin, J. Levesque, et L. Laberge Lebel, “Modélisation de la section des fils d’un tissu interlock 3D à l’aide d’une équation elliptique paramétrée par quadrant,” dans *15e Expo Hightex 2017*, Montreal, Avril 2017.

- [64] Brazeau-Séguin, J and Levesque, J and Laberge Lebel, L, “Modélisation de la section des fils d’un tissu interlock 3D à l’aide d’une équation elliptique paramétrée par quadrant,” dans *Colloque étudiant CREPEC*, Montreal, Juin 2017.
- [65] J. Brazeau-Séguin, J. Levesque, et L. Laberge Lebel, “MODELLING 3D INTERLOCK FABRICS USING ELLIPTIC YARN SECTION WITH QUADRANT-PARAMETRIC EQUATIONS,” dans *12th Joint Canada-Japan Workshop on Composites*, Takayama, Juillet 2018.
- [66] M. Karahan, S. V. Lomov, A. Bogdanovich, D. Mungalov, et I. Verpoest, “Internal geometry evaluation of non-crimp 3d orthogonal woven carbon fabric composite,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 9, pp. 1301–1311, Mai 2010.
- [67] L. Yang, I. Straumit, D. Vasiukov, S. V. Lomov, et P. Panier, “Multi-scale material model for 3D composite using Micro CT Images geometry reconstruction,” dans *17th European Conference on Composite Materials*, Munchen, Germany, Juin 2016.
- [68] Y. Mahadik, K. A. R. Brown, et S. R. Hallett, “Characterisation of 3d woven composite internal architecture and effect of compaction,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 7, pp. 872–880, 2010. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X10000801>
- [69] Y. Mahadik et S. R. Hallett, “Finite element modelling of tow geometry in 3d woven fabrics,” *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 9, pp. 1192–1200, 2010. En ligne : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X10001302>
- [70] S. V. Lomov, A. E. Bogdanovichb, D. S. Ivanova, K. Hamadac, , T. Kurashikic, M. Zakoc, M. Karahand, et V. Ignaas, “Finite element modelling of progressive damage in non-crimp 3d orthogonal weave and plain weave e-glass composites,” dans *2nd World conference on 3D fabrics*, 2009, Conference Proceedings.
- [71] V. Koissin, D. Ivanov, S. V. Lomov, et I. Verpoest, “Fibre distribution inside yarns of textile composite : Geometrical and fe modelling,” dans *TexComp-8 Int. Conference*, 2006, Conference Proceedings.
- [72] E. W. Weisstein, “Superellipse,” From MathWorld—A Wolfram Web Resource, 2018. En ligne : <http://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>
- [73] F. Desplentere, S. V. Lomov, D. L. Woerdeman, I. Verpoest, M. Wevers, P. Szucs, et A. Bogdanovich, “Geometrical characterization of 3-D warp-interlaced fabrics,” dans *SAMPE Symposium and Exhibition*, vol. 48th, Long Beach, CA, Mai 2003, pp. 1335–1347.

- [74] Wolfram|Alpha, Wolfram Alpha LLC, 2018. En ligne : [http://www.wolframalpha.com/input/?i=integrate+\(sin\(x\)%5E\(n%2B1\)*cos\(x\)%5E\(m-1\)\)+dx+from+pi%2F2+to+0](http://www.wolframalpha.com/input/?i=integrate+(sin(x)%5E(n%2B1)*cos(x)%5E(m-1))+dx+from+pi%2F2+to+0)
- [75] E. W. Weisstein, “Gamma Function,” From MathWorld—A Wolfram Web Resource, 2018. En ligne : <http://mathworld.wolfram.com/GammaFunction.html>
- [76] —, “Euler Angles,” From MathWorld—A Wolfram Web Resource, 2018. En ligne : <http://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>
- [77] S. D. systèmes, “ABAQUS FEA,” octobre 2018. En ligne : <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaqusstandard/>
- [78] CLEMEX, “Camera et Logiciel Clemex,” octobre 2018. En ligne : <http://www.clemex.com/en/Products/Hardware-Equipment/Cameras/USB-2-0-CMOS>

ANNEXE A ÉTUDE DES MODÈLES

Évaluation du potentiel de rentabilité de différentes techniques de modélisation des préformes textiles 3D

J. Brazeau-Séguin¹, J. Levesque¹, L. Laberge Lebel¹

¹- julien.brazeau-seguin@polymtl.ca, LABSFCA, Génie Mécanique, Polytechnique Montréal, QC, Canada



1-Contexte

Les préformes **textiles 3D** sont de plus en plus utilisées pour fabriquer des pièces composites dans l'industrie aéronautique^[1]. Les **métiers à tisser 3D** de dernière génération ont la capacité de fabriquer des préformes à géométrie **complexe** et avec une **grande précision**.

Plusieurs méthodes de **modélisation 3D** ont été développées afin de prédire la géométrie réelle du tissu à la sortie du métier^[2-4]. Divers paramètres influencent cette relaxation du tissu :

- **Paramètres de tissage** (dimensions des composantes du métier, tension dans les fils, paramètres d'avance du tissu)
- **Propriétés des fibres** (Type de matériaux, titrage des fils, coefficient de friction)
- **Type d'architecture** du tissu (interlock à angle ou orthogonal, liage couche à couche ou à travers la profondeur)

2-Problématique

L'industrie textile doit être apte à développer **rapidement** des tissus 3D répondant à des applications précises et de **quantifier** leurs avantages comparativement à d'autres solutions plus conventionnelles (ex: fibres unidirectionnelles ou tissus 2D)

Pour ce faire, il est nécessaire d'être en mesure de caractériser la **géométrie réelle** de tout type de tissus 3D et d'évaluer les **propriétés mécaniques** du composite à renfort tissé 3D.

- 3 solutions possibles
 1. Évaluations expérimentales
 2. Modélisation 3D (Logiciels informatiques)
 3. Une combinaison des deux possibilités

La précision de ces méthodes de modélisation 3D a déjà été démontrée dans plusieurs travaux de recherche. Toutefois, pour un designer textile, la **profitabilité** reliée à l'utilisation de logiciels de modélisation de textiles 3D est encore **peu connue** et **quantifiable**.

3-Objectif

Évaluer le **potentiel** de rentabilité des différentes méthodes de modélisation en modélisant un tissu 3D interlock type dans différents logiciels

- Analyser la facilité et la flexibilité de **modélisation** du tissu type.
- Analyser la performance de la **relaxation** du tissu
- Analyser la qualité et l'utilité des **données** à recueillir de la géométrie finale

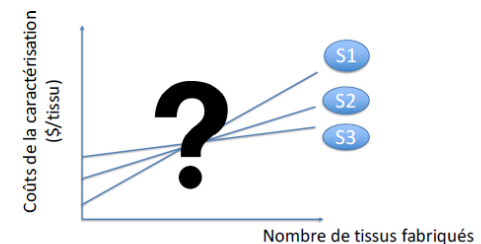


Figure 1 : Comparaison fictive de la profitabilité des 3 solutions possibles

4-Matériaux et méthode

Définition du modèle

Type de tissu

- **Interlock orthogonal** à travers la profondeur

Matériaux

- Fibre de carbone Toho **Tenax HTS40** 13F (12k) et 13E (3k)

Type de fils

- Fil de **chaîne** (**bleu**) → fils de liage (3k) ou brins bourreurs (12k)
- Fil de **trame** (**gris**) → fils bourreurs (12k)

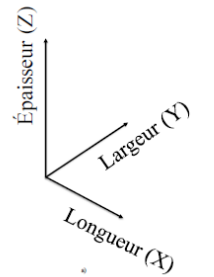


Figure 2 : Définition générales du système d'axes des tissus 3D

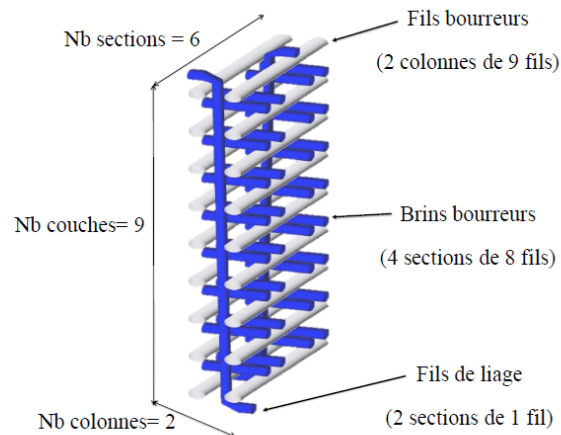


Figure 3 : Représentation détaillée du tissu à modéliser dans les différents logiciels

Méthodes de modélisation

Géométrie

- Fondement sur des principes **géométrique** et **cinématique** des fils

Mécanique

- Calcul des **comportements** et **interactions** mécaniques entre les fils ou fibres

Hybride

- Modèle géométrique enrichi par des **équations mathématiques** prenant compte de certains comportements mécanique des fils d

5-Résultats et discussion

Méthode géométrique (TexGen^[5])

Modélisation

- Très grand nombre de configurations réalisable
- Une caractérisation expérimentale détaillée est nécessaire

Relaxation

- L'algorithme intégré est très limité, il permet une légère modification de la forme des fils de trames et de liages

Données utiles

- Bonne flexibilité au niveau de l'exportation (.stl, ABAQUS, ANSYS, ...)

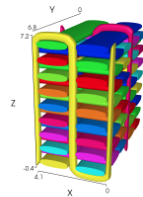


Figure 4 : Représentation de la structure initiale du tissu dans TexGen

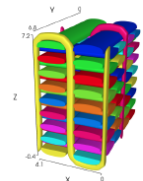


Figure 5 : Représentation de la structure finale ou relaxée du tissu dans TexGen

Méthode mécanique (DFMA^[6])

Modélisation

- Facile, très flexible et intuitive
- Ne nécessite aucune évaluation expérimentale

Relaxation

- L'algorithme d'interaction mécanique entre les fibres est sophistiqué et précis, mais souffre d'un long temps de calcul.
- Besoin de se familiariser avec tous les paramètres de l'algorithme

Données utiles

- Exportation au format stl seulement
- Offre plusieurs possibilités de représentation (couleurs des fibres, vues de coupes, sélection des éléments à afficher, ...)

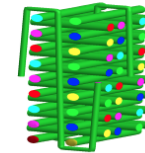


Figure 6 : Représentation de la topologie initiale du tissu dans DFMA

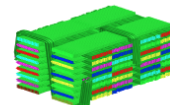


Figure 7 : Représentation de la structure finale après les différentes étapes de relaxation du tissu dans DFMA

Méthode hybride (WiseTex^[7])

Modélisation

- Moins intuitive et requière beaucoup de connaissances (comportements et propriétés mécaniques des fibres)
- Choix de sections des fils limité

Relaxation

- Rapide à calculer et procure une bonne de flexibilité sur les paramètres de relaxation

Données utiles

- Description détaillée des dimensions et propriétés du tissu et de chacun des fils
- Bonne flexibilité au niveau de l'exportation (.stl, ABAQUS, ANSYS)
- Suite de logiciels complète pour évaluer diverses propriétés du tissu modélisé (TexComp, FlowTex, VRTex)

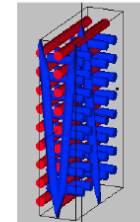


Figure 8 : Représentation de la structure sans ondulation dans WiseTex

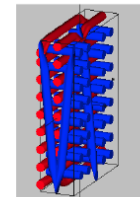


Figure 9 : Représentation de la structure avec ondulation dans WiseTex

6-Conclusion

Les méthodes évaluées ont le **potentiel de diminuer les coûts** de la caractérisation des propriétés mécaniques des tissus en remplaçant les tests expérimentaux par des tests dans des logiciels **d'éléments finis**.

- **TexGen** nécessite une caractérisation géométrique du tissu énormément détaillée et coûteuse en temps
- **DFMA** nécessite une très bonne maîtrise de l'algorithme de relaxation et de nombreuses heures de calcul
- **WiseTex** nécessite beaucoup de connaissances et de tests expérimentaux sur le comportement des fibres.

7-Travaux futurs

Cette évaluation a permis de bien cerner le **contexte actuel** dans lequel se trouve l'industrie textile. En collaboration avec le groupe CTT, une **nouvelle approche** de modélisation sera développée afin de mieux répondre aux besoins de l'industrie.

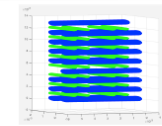


Figure 10 : Développement d'un nouveau modèle répondant davantage aux besoins de l'industrie textile

8-Références

- [1] Prichard A. 11 - Three-dimensional textiles in the aerospace industry. Advances in 3D Textiles: Woodhead Publishing; 2015. p. 293-304.
- [2] Zhou G, Sun X, Wang Y. Multi-chain digital element analysis in textile mechanics. Composites Science and Technology. 2004;64(2):239-44.

- [3] Long AC, Brown LP. 8 - Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen. Composite Reinforcements for Optimum Performance: Woodhead Publishing; 2011
- [4] Lomov SV. 7 - Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: WiseTex. Composite Reinforcements for Optimum Performance: Woodhead Publishing; 2011. p. 200-38
- [5] Sherburn M. TexGen. 3 ed: University of Nottingham; 2007.
- [6] Lomov S. WiseTex. Leuven, Belgique: University of Leuven; 2013.
- [7] Wang YQ. DEA Fabric Mechanics Analyzer. 0.5.1 ed: Kansas State University; 2015.

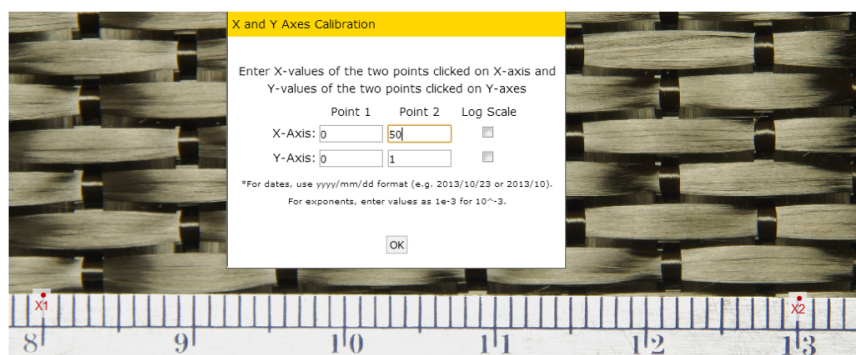
9-Remerciements

Ce projet est financé par Polytechnique Montréal et le Groupe CTT

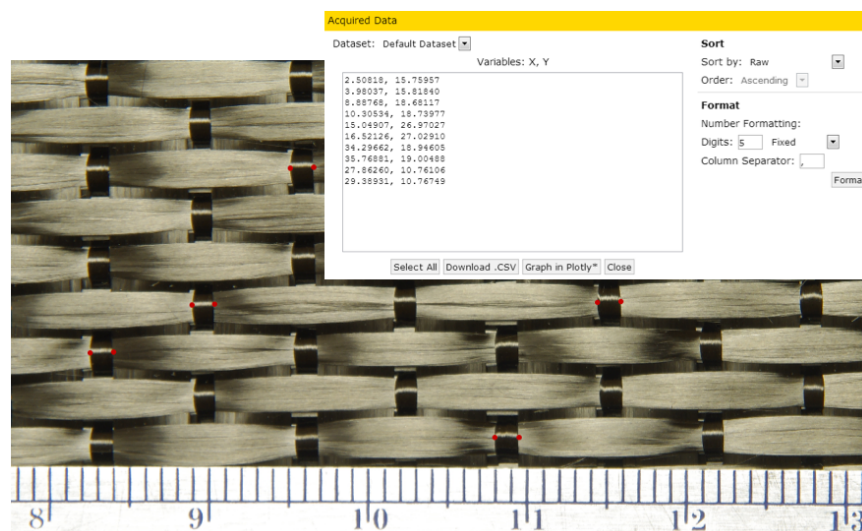


ANNEXE B EXEMPLE DE PRISE DE MESURE SUR UNE IMAGE D'UN TISSU

Les figures ci-dessous présentent la technique utilisée pour mesurer sur une photo la largeur des fils.



Calibration de l'axe des x pour le tissu NCS-1



Prise de mesure de la largeur des fils de liage pour le tissu NCS-1

ANNEXE C ÉTUDE D'UNE SECTION DE FIL DIVISÉE EN QUADRANT

MODELLING 3D INTERLOCK FABRICS USING ELLIPTIC YARN SECTION WITH QUADRANT-PARAMETRIC EQUATIONS

J. Brazeau-Seguin¹, J. Levesque², L. Laberge Lebel¹

1- julien.brazeau-seguin@polymtl.ca, ACFSLAB, Mechanical engineering, Polytechnique Montreal, QC, Canada

2- CTT Group, 3000 avenue Boule, Saint-Hyacinthe, Quebec J2S 1H9, Canada



Research Center for
High Performance Polymer
and Composite Systems



POLYTECHNIQUE
MONTREAL



LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE



1-Context

Geometrical approach allow to model easily et rapidly 3D interlock fabrics[1]. The cross section representation of the yarns are usually define by elliptic shapes, such as an ellipse, a lenticular or a power ellipse[2].

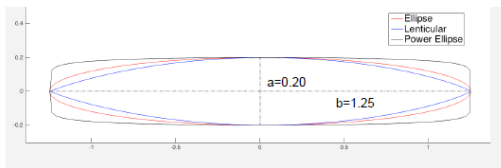


Figure 1. Illustration of 3 different elliptic shapes defined by the axis a & b and a super-ellipse equation [3].

2-Problematic

Complex cross-section shapes are detected in some 3D fabrics when strong interactions occurs between yarns [4]. With standard elliptic equations, it's not possible to generate non symmetric cross-section shapes. A generalised approach with quadrant-parametric equations need to be investigated. The benefits of this refine but complex shape definition is evaluated.

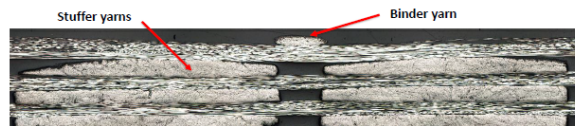


Figure 2. Representation of the interaction between a binder yarn and the stuffer yarns in a 3D non-crimp fabric

3-Goals

Validating the potential of using a quadrant-parametric cross-section definition over a standard elliptic approach[5].

- Develop the quadrant-parametric equations
- Model a 3D orthogonal interlock fabric [4]
- Compare the fabric thickness of the model with the reality

4-Method

Geometric approach

- Supper-ellipse equation divided in quadrant

$$x = a_Q * \cos^{\frac{2}{m_Q}}(\theta) \quad (1)$$

&

$$y = b_Q * \sin^{\frac{2}{n_Q}}(\theta) \quad (2)$$

- Where a_Q is the length of each quadrant
 b_Q is the height of each quadrant

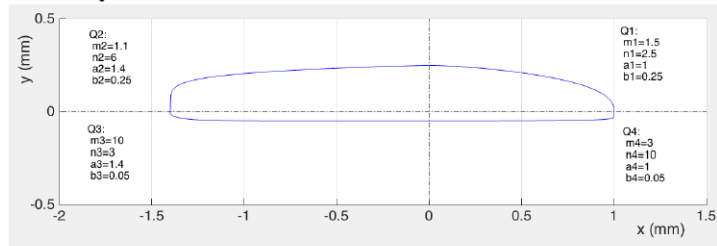


Figure 3. Illustration of a yarn cross-section divided in quadrant with the equations 1 & 2.

Modeled fabric

- Non cimp structure (NCS) of 9 layers
- Weaving parameters:
Reed spacing = 3mm
Take up= 3mm
- Stuffer yarns (Grey)
12k, width = 2.4mm,
Power ellipse
- Binder yarns (blue)
2k, width = 1mm,
symmetrical ellipse
- Weft yarns (Green)
12k, Width = 2.8mm,
lenticular
- Fibre diameter : $7\mu m$
- Yarns fibre volume fraction: 75% for all yarns
- Yarns cross-section definition: 48 dots
- Tension ratio
 $T_Binder/T_Weft=2$

Definition of the analysed zone

- Interaction zone between the binder and stuffer yarns (Red)
Compression in Z of the stuffer yarns caused by the binder yarns
Non-symmetrical cross-section equations of the stuffer yarns

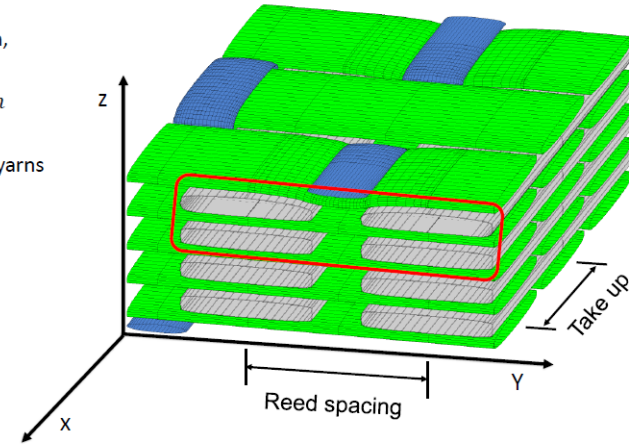


Figure 4. Weaving parameter definition and the interaction zone of the modeled 3D fabric.

5-Results & discussion

Representation of the interaction zone

- View of the YZ plane
- **Cross-section definition:** (Base on a 3D fabric in the literature [4])
Cross-section 1 & 2: Non symmetrical quadrant-parametric equations
Cross-section 3 & 4: Symmetrical power ellipse equations

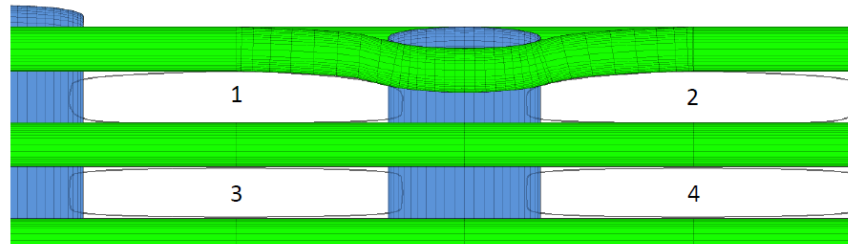


Figure 5 : Comparison of the cross-section shapes 1 to 4 of the stuffer yarns. The cross-section 1 and 2 are defined by a super-ellipse divided in quadrant and the cross-sections 3 and 4 are defined by a power ellipse[2].

Thickness analysis

- Variation of the cross-section equations of the stuffer yarns
- Fix weft and binder yarns dimensions
- Thickness of the analysed 3D fabric[4] : 2.50mm

Table I. Comparison of three different modeling approaches of the stuffer yarns in a 9 layers non-crimp 3D fabric.

Stuffer cross-section equation (Without yarns interpenetration)	Yarn cross-section thickness only (mm)	Modeled fabric thickness (mm)	Deviation with the real fabric thickness(%)
Standard ellipse only (Symmetric)	0.350	2.695	7.80
Power ellipse only (Symmetric)	0.298	2.671	6.84
Quadrant-parametric equations for the interaction zone & Power ellipse in the middle of the fabric (Non Symmetric)	0.316 & 0.298	2.579	3.16

6-Conclusion

The interaction analysis between the binder and the stuffer yarns allow to validate the potential of the quadrant-parametric equations for the yarn cross-section definition. This non symmetrical approach allow to model a complete 3D interlock orthogonal fabric with an overall thickness deviation of only **3.16%** when compare to the real fabric[4]. On the other side, symmetrical standard elliptic and power ellipse cross-section definition allow to model 3D fabric with **7,80%** and **6,84%** thickness deviation.

7-Future works

Following this first analysis, future works will be made on the yarns cross-section path in order to avoid interpenetration between yarns such as illustrated in figure 5. Also, images analysis will be realised in order to identify clearly all the critical interaction zones in the 3D interlock orthogonal fabrics and other standard 3D fabrics.

8-References

- [1] Brazeau-Seguin, J & al. Évaluation du potentiel de profitabilité de différentes techniques de modélisation des préformes textiles 3D. Colloque du CREPEC, June 2016
- [2] Gommer F, Brown LP, Wedgwood KCA. Analytical method using gamma functions for determining areas of power elliptical shapes for use in geometrical textile models. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016;81:222-4.
- [3] Weisstein, Eric W. "Superellipse." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>
- [4] Isart N, Mayugo JA, Blanco N, Ripoll L, Solà A, Soler M. Geometric model for 3D through-thickness orthogonal interlock composites. Composite Structures. 2015;119:787-98.
- [5] Brazeau-Seguin, J & al. Développement d'une méthode de modélisation des tissus 3D par approche géométrique. 11^e Colloque annuel du CREPEC, December 2016

9-Aknowledgment

This project is
financed by
**Polytechnique
Montreal, MITACS
and CTT group.**

MITACS

Groupe CTT Group

**ANNEXE D ARTICLE 1 : RELATING WEAVING PARAMETERS AND
3D WOVEN FABRIC DESIGN WITH A GEOMETRICAL MODELLING
APPROACH**

Authors :

Julien Brazeau-Seguin (1,2,3)

Jonathan Levesque (2,3)

Louis Laberge Lebel (1,2)

Affiliations :

1 : Advanced Composite and Fiber Structure laboratory (ACFSlab), Polytechnique Montréal, Mechanical Engineering Department, C.P. 6079, Succ. Centre-ville Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7

2 : Research Center for High Performance Polymer and Composite Systems (CREPEC), Polytechnique Montréal, C.P. 6079, Succ. Centre-ville Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7

3 : Groupe CTT, 3000 avenue Boullé, Saint-Hyacinthe, Québec J2S 1H9, Canada

Published in :

Automated Composites Manufacturing : Proceedings of the Third International Symposium

Date of submission : 21/02/2017

Date of publication : 7/06/2017

ABSTRACT

Aeronautic composite parts made with 3D interlock woven reinforcements benefit from near net shape design capabilities and good damage tolerance. Mastering this complex automated process is critical in order to challenge the conventional construction of composite parts using laminated 2D fabrics. This study aims at understanding and predicting the relation between 3D weaving parameters and the real fabric geometry. A yarn-based geometric model has been developed to fulfill this critical need. Generally, non-mechanical 3D woven models require extensive experimental characterization of the fabric geometry. On the other side, mechanical modelling of 3D woven fabrics require large amount of computer resources. Therefore, those types of models are rather inefficient to rapidly generate an accurate 3D model according to weaving parameters. The developed approach is directly related to a specific manufacturing weaving software in order to generate a realistic 3D model automatically. Warp and weft tension ratio, multiples yarn types with constant elliptic cross-section shapes are some of the key features of the developed model. This tool aims at reducing manufacturing costs by relating the weaving parameters to achieve specific fabric requirements in a short time. The model precision and capability were validated with experimental observations and testing. 6 different interlock fabrics were modelled and subsequently woven. The fabric thickness was measured following the ASTM D1777 standard. The observations validated the selected modelling approach.

1. INTRODUCTION

In aeronautic and automotive industries, manufacturing automatization of composite parts is highly critical. In this regard, those industries show great interest in 3D weaving process. This process allows the manufacturing of multi-layered fabrics in one step and near net shape design capabilities [1]. Moreover, 3D fabrics have superior out-of-plane performances compared to traditional 2D fabrics stacked together for the same composite application [2]. The fan case and rotor blades of the Leap-X engine [1] are two great examples who benefit from 3D woven fabric strengths. However, mastering this textile process while finding beneficial applications for 3D fabrics is challenging. Accurate modelling of the 3D textile structure can be used to alleviate this challenge. Multiple modeling simulation tools were developed to facilitate the conception of 3D fabrics. Lomov *and al.* have

developed a modelling software commonly known as Wisetex [3]. The foundation of this model is principally based on a geometric yarn-based approach supplemented by yarn mechanical behaviors' equations. The yarns' cross-section shape is elliptic or lenticular. Their area dimensions are defined by experimental observation on cross-sections. The authors have observed great variability of the yarn fiber area fraction (YFAF) between 60% to 80% for 3D and 2D woven fabrics [4,5]. Furthermore, local fiber distribution in the yarn can be adjusted in the model. This approach improves the accuracy of the model without drastically impacting the computational time. However, yarn morphology and fabric compressive mechanical behavior need to be characterized experimentally. A more flexible approach has been developed by Brown *and al.* [6]. The authors developed a geometric model, i.e., Texgen, who offers immense versatility on the fabric representation. Their proposed approach has the ability to generate complex yarn cross-section shapes within the modelled fabric. Yarn trajectories between each defined cross-section are interpolated using linear or cubic equations. This modelling approach relies on extensive characterization of the 3D fabric's geometry.

Wang *and al.* developed a mechanical modeling approach called the digital elements [7]. This approach models multi-filament yarns using connected beam finite elements. Mechanical interactions between fibers are simulated to generate the fabric's relaxed state. This mechanical modelling approach limits the need for experimental characterization. However, on the other hand, it requires a large amount of computer resources to generate an accurate relaxed fabric.

Actual modeling strategies rely on extensive experimental characterization or large computer resources. This can limit their use in textile SMEs since it can slow the development of tailored textile architectures. In this present work, another modeling approach has been developed to fulfil rapid modelling capabilities. This model was tested by reproducing six carefully selected 3D woven interlock fabrics. The modelled fabrics' YFAF were adjusted to match actual fabrics' thickness. This first experimental validation will help to guide the future development of this approach.

2. MODELLING APPROACH

A geometrical modeling approach has been realized within MATLAB programming software [8]. Figure 1 shows a random 3D interlock fabric modelled according to this approach.

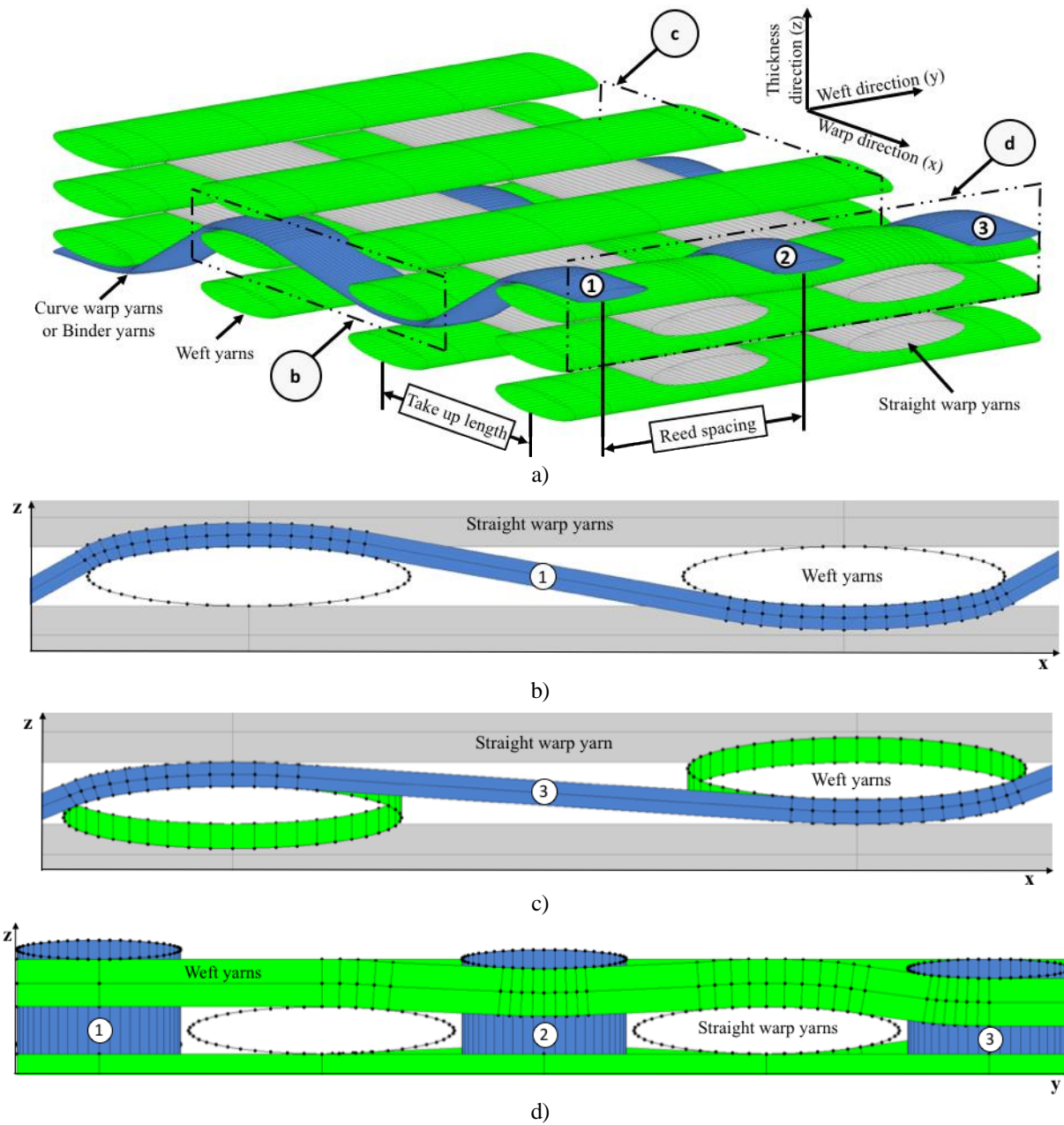


Figure 1. Yarn-base geometric modelling definition of a random 3D interlock woven fabric in an isometric view covering the take up length and reed spacing weaving parameters definition and yarns identification a) in the warp direction without b) or with c) a warp/weft tension ratio influence and in the weft direction with a varying tension ratio of 0, 1, and 2 for the binder yarns no 1, 2 and 3 respectively.

Figure 1a shows the isometric view of the modelled fabric along with 3D weaving machine parameters, specific section views and yarn directions and identification. A general representation of

a 3D weaving machine is well defined in Yang's work [7]. The reed spacing is defined as the distance between the center of two teeth of the reed. In our model, this spacing is correlated to the warp yarn filling pattern in each space of the reed. For the modelled fabric in figure 1, the reed spacing is the distance between the center of each numbered binder yarns as indicated in figure 1a. The fabric take up is associated with the pulling action of the warp yarns. The take up action occurs after the insertion of the last weft yarn completing a vertical colon of weft yarns. Then, the take up length parameter is defined as the distance between two horizontal weft yarns as shown in figure 1a. Vertically, the yarn centers are positioned by stacking the yarns together without penetration. In each layer, the thickest yarn height value is used to define vertical stack-up.

Figure 1b shows the warp direction cross-sections of the fabric. The elliptical cross-sections of yarns are modelled by a series of points linked by straight lines. The number of points around the cross-section is defined by the user. The coordinates of the points are calculated using the parametric ellipse equations [9] and using the yarn width and area. The yarn width is initially defined by the user based on measurements. The yarn cross-section area is defined by the fiber diameter, fiber count and the YFAF of each different yarn type. The cross-section area and shape are considered constant along the length of each yarn.

Yarn center-lines are represented by multiple nodes linked with straight lines. A set of elliptical cross-section points is defined for each center-line nodes. Yarn surfaces are created by linking corresponding elliptical cross-section points. The curved yarns are modelled according to a "rope in tension" concept between two adjacent cross-yarns. Following this concept, a curved yarn follows the cross-section curvature of a given cross-yarn until it jumps tangentially to the next cross-yarn. The nodes discretization along the curved yarn length is matching the cross-yarn cross-section discretization it lies onto, as shown in figure 1b. The curved warp yarn paths are defined by the fabric weaving patterns. Crimp can be induced in the weft yarns by the curved warp yarns or binder yarns, as shown in figure 1c and 1d. This crimp is induced by vertically displacing the cross-section of the weft yarn in interaction with a curve warp yarn. The amount of crimp is defined in the model by the warp/weft tension ratio (TR) parameter. The vertical displacement value is calculated by the multiplication of the TR to the related curved warp yarn half-height. Figure 1c shows the influence of a $TR=2$ on the curved warp yarn path and the weft yarn cross-sections. Figure 1d shows a comparison of the different warp/weft TR on the binder cross-section positions and on the curved weft yarn representation. It is seen in Figure 1d that the warp binder yarn no. 2, having a TR of 1, has half of its

cross section emerging from the fabric's surface. The warp binder yarn no. 3 has a TR of 2, thus all its top surface is matched to the fabric's surface.

3. EXPERIMENTAL

Six carbon fiber yarn 3D interlocks woven fabrics were produced using a custom-built 3D weaving machine. It is composed of creel feeding up warp yarns through several heddles and reed dents. The vertical displacement of each heddle is computer-controlled. Weft yarns are inserted between warp yarn layers. The fabric density is controlled by the take up action and the reed spacing. Detailed information on the 3D woven fabrics are presented in table I. Two main classes of woven fabric were produced. First, 3D orthogonal interlock namely non-crimp structures (NCS) have been selected with a variation of the weft yarn density. Secondly, three multi-layer interlock of 2D woven twill 2-2 fabrics were woven with different warp and weft yarn densities. All fabrics were woven with Toho Tenax HTS40 F13 12K carbon fiber yarn. The NCS also comprised a binder yarn that was a Toho Tenax HTS40 E13 3K carbon fiber yarn. The carbon fiber diameter in both yarn type was 7 μm . Fabric thickness was measured following the ASTM standard test method D1777. Ten thickness measurements were collected for each fabric.

TABLE I. CRITICAL WEAVING PARAMETERS OF THE STUDIED 3D WOVEN FABRICS

Fabric name	Nb. Layers*	Reed spacing (mm)	Take up (mm)	Fiber count per yarn		
				Warp	Weft	Binder
NCS-1	11	3.175	2.352			
NCS-2	11	3.175	2.856	12K	12K	3K
NCS-3	17	3.175	2.856			
Twill-1	5	3.175	3.235			
Twill-2	5	3.175	3.135	12K	12K	N/A
Twill-3	12	2.500	2.500			

*The number of layers for NCS is the addition of the warp and the weft along the thickness direction excluding the binder yarns. The number of layers for the Twill fabric is the total amount of weft/warp yarns pairs along the thickness direction.

High magnification photographs (Pentax K-x, Sigma DC 28-300mm 1:3 macro lens) of the top surface of all fabrics were taken. Yarn widths were measured on the photographs using appropriate calibration. Five representative values were collected for each yarn measurement.

On the modeling side, ellipse cross-section equations of all yarns are defined by 48 points. The YFAF was adjusted for each fabric in order to obtain the same fabric thickness as the experimental measurement. Warp, weft and binder yarns have the same YFAF. Warp/weft TR was considered constant for all fabrics. Equal tension between warp and weft yarns ($TR=1$) was imposed in the model for the Twill fabrics and a higher warp/weft TR ($TR=2$) for the NCS fabrics.

4. RESULTS & DISCUSSIONS

Visual comparison of all six woven fabrics is presented in figure 2. Top experimental views of the real fabrics in figure 2a are compared to the top views of the modeled fabrics in figures 2b. Isometric views of the 3D modeled fabrics are presented in figure 2c. Graphical representation of the fabrics were generated in less than 30 seconds using a regular desktop computer.

For the NCS in figure 2a and 2b, it is possible to validate the effect of the take up length value presented in table I with the gap between weft yarns. Larger take up length values for the NCS-2 and NCS-3 create a larger weft inter-yarn gap compared to the NCS-1. The influence of the reed spacing could not be validated on the NCS since they have all the same reed spacing. Observation of the gap between the straight warp and binder yarns on both top views of the NCS in figure 2 are all similar. Noticeable difference for all NCS is the cross-section width variations of the weft yarns in figure 2a compared to the constant cross-section widths in figure 2b. Further investigations are critical to understand the width variations' impact on the fabric's mesostructure.

The gaps between yarns for the Twill fabrics seem to follow different tendency than the NCS. The Twill-1 fabric has a higher take up value than the Twill-2 fabric in table I, but in figure 2a, the gaps between weft yarns for the Twill-1 fabric are smaller than the Twill-2 fabric. For the Twill-3 fabric, the gap between yarns are smaller in the experimental top view in figure 2a compared to larger one in the modeled top view in figure 2b. Modeled yarn widths of both warp and weft yarns for the Twill-3 fabric were decreased by 12% in the model in order to avoid yarn interpenetrations.

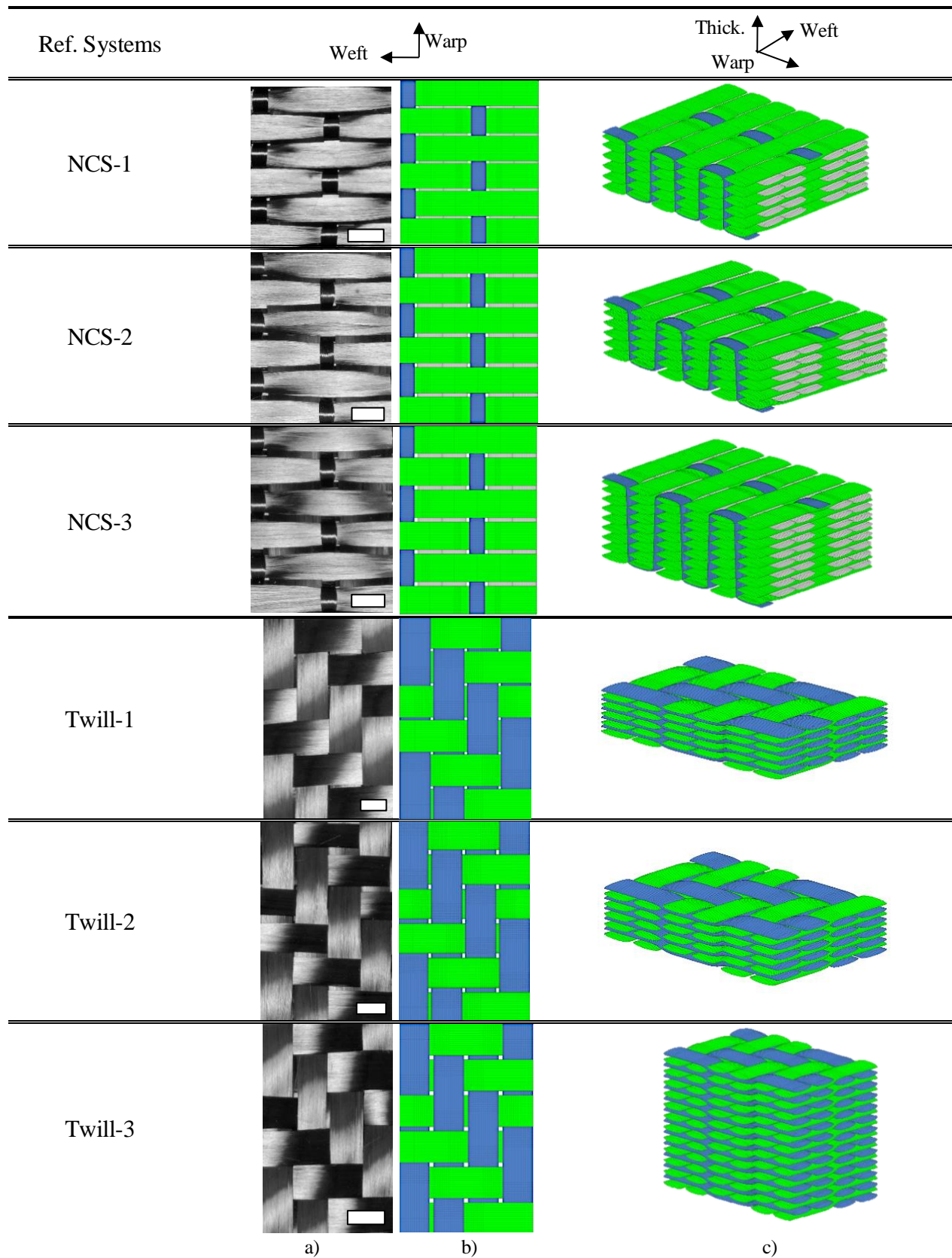


Figure 2. Visual comparison of the real a) and the modeled b) images of the top view of each analyzed fabric. Isometric view c) of the modeled fabric is also presented. Scale bar length in a) is 3.175mm.

Those initial interpenetrations are attributed to the constant elliptic cross-section shape of the yarns, small reed spacing and small take up length value. More observations need to be made to accurately model the Twill fabrics' mesostructure.

Additional information on the fabrics dimensions related to the width and thickness measurements and modelling are presented in table II. For the NCS, the cross-section width of all yarns are the same for the experimental and modeled results. It is seen that the yarn width increases with increasing take-up length weaving parameter. For the warp and binder yarns, their cross-section widths are all similar which directly correlate to the constant reed spacing. The YFAF for all three NCS fabrics are similar to the suggested results in the literature with an average value around 70% [5,10]. As for the FFVF, the calculated values are lower than the suggested results of 50-55% in the literature [1,2,5,10,11].

TABLE II. MODEL VALIDATION WITH THE FABRIC MEASURED DIMENSIONS

Fabric name	Measured				Modeled					
	Yarn cross-section width ± standard deviation				Fabric thickness (mm)	Yarn cross-section width (mm)			YFAF FFVF (%) (%)	
	Fabric thickness ± standard deviation (mm)	deviation (mm)				Warp	Weft	Binder		
		Warp	Weft	Binder						
NCS-1	4.32±0.06	2.21±0.03	2.17±0.02	1.36±0.04	4.32	2.21	2.17	1.36	68.5	45.9
NCS-2	4.24±0.02	2.24±0.03	2.49±0.03	1.36±0.04	4.24	2.24	2.49	1.36	64.4	41.8
NCS-3	6.54 ±0.06	2.20±0.06	2.49±0.03	1.39±0.08	6.54	2.20	2.49	1.39	65.1	41.7
Twill-1	3.67 ±0.06	3.14±0.04	3.21±0.05		3.67	2.92	2.98		54.3	40.1
Twill-2	4.09 ±0.03	3.11±0.04	2.92±0.06	N/A	4.09	2.89	2.72	N/A	51.3	36.8
Twill-3	11.26 ±0.19	2.49±0.03	2.50±0.04		11.26	2.19	2.20		57.1	40.8

For the Twill fabrics, all the modeled yarn cross-section widths are 7 to 12% smaller than the experimental values. Width values were reduced since interpenetrations between the constant elliptic yarns were observed in the modelled structures. Similarly to the NCS, the yarn width increases with increasing take-up length weaving parameter. The same tendency occurs for the reed spacing and the cross-section width for the warp yarns. For most of the Twill fabrics, similar correlation between the YFAF calculated with the model and approximated literature value of 59% [4]. Only the Twill-2 has

more than 7% deviation from the literature. As for the FFVF, all Twill fabrics are similar to the literature values of 35-40% [2,11]. However, knowing that the yarn width of all Twill fabrics has been reduced, the real fabrics should have higher FFVF values than the modeled results.

Finally, considerable variations of the YFAF between the two fabric types tend to indicate that a more complex model is necessary to represent accurately the geometry of the modeled fabrics. Implementing variable cross-sections along yarn path and a flexible cross-section shape definition, such as a power-ellipse [12] is to be considered.

5. CONCLUSION

A yarn-based geometric modelling approach was developed in order to help the automatization of the fabrics conception process. The model relies on weaving parameters and a limited amount of experimental data. A first version of the model with constant elliptic yarn cross-section was validated with visual observations and thickness fabric measurements.

- Modeling 3D NCS shows good correlation between visual observations, good comparison of the YFAF data to the literature and minor differences for the FFVF.
- Modeling multi-layers interlock of 2D woven twill 2-2 fabrics presents small differences between visual observations and similar correlation of the YFAF and FFVF data compared to the literature.
- Correlation between take up length value, reed spacing and yarn cross-section width was confirmed for both types of fabrics.

Varying yarn cross-section shapes and dimensions along yarn length needs to be implemented to help the development of an efficient automated modeling process with reduced computational time and few experimental characterization.

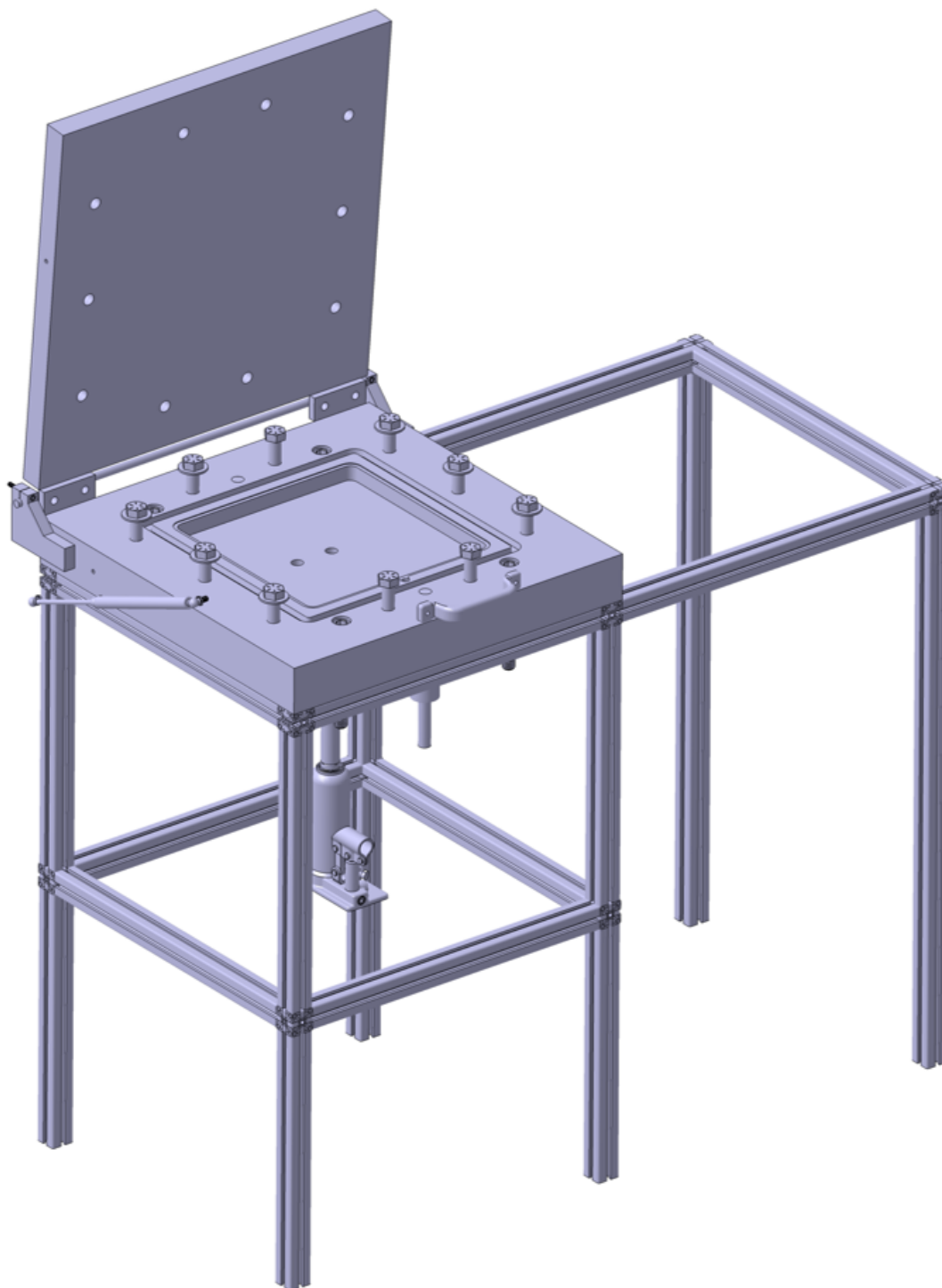
ACKNOWLEDGMENTS

The author wish to acknowledge the financial support of the CREPEC research center, Mitacs (Grant no IT07904) and the CTT group.

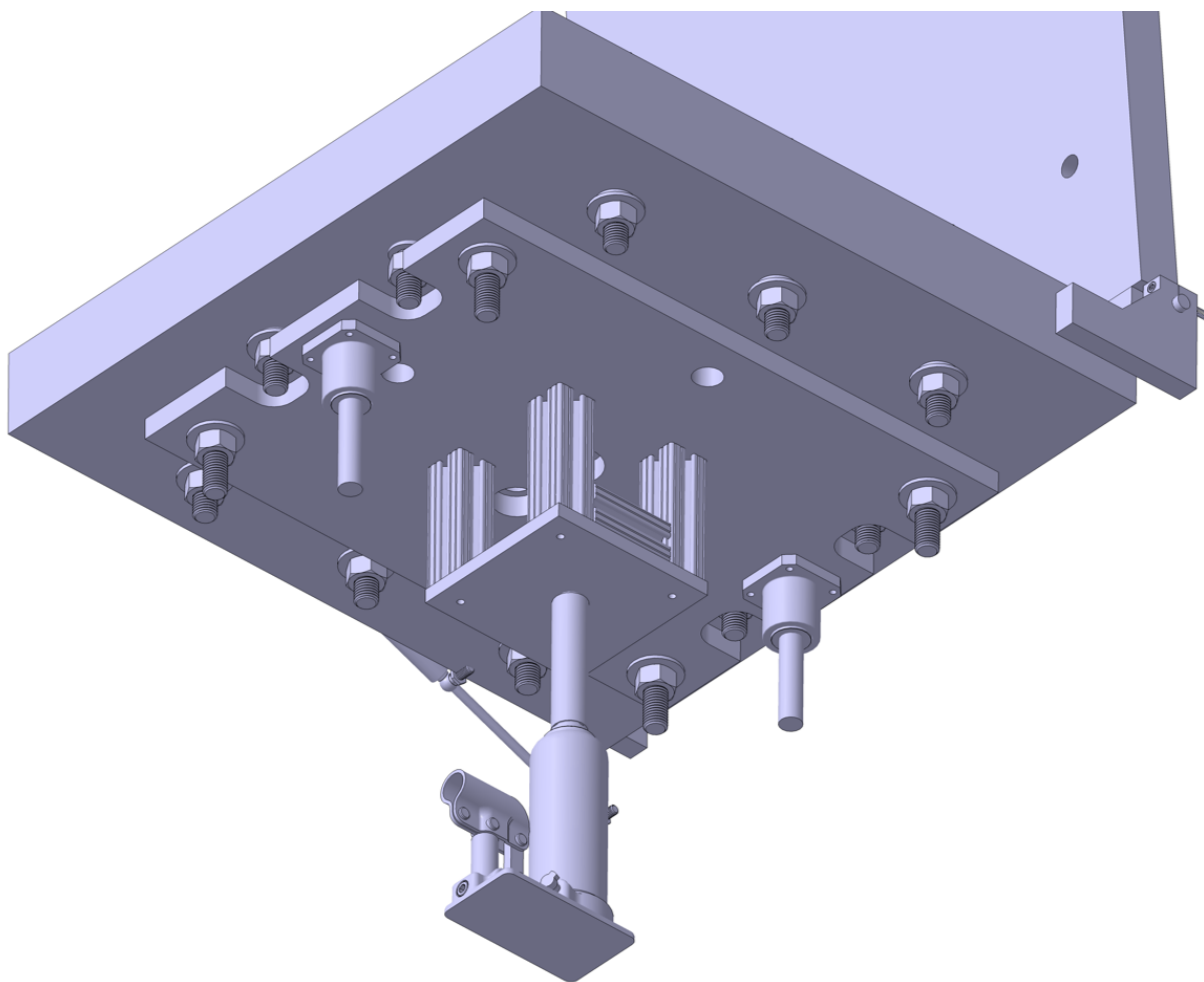
REFERENCES

- [1] Coupé D. 4 - "Woven reinforcements for composites A2," - Boisse, Philippe. Composite Reinforcements for Optimum Performance: Woodhead Publishing; 2011. p. 89-115.
- [2] Cox BN, Dadkhah MS, Inman RV, Morris WL, Zupon J. "Mechanisms of compressive failure in 3D composites. *Acta Metallurgica et Materialia*," 1992;40(12):3285-98.
- [3] Lomov SV. 7 - "Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: WiseTex," Composite Reinforcements for Optimum Performance: Woodhead Publishing; 2011. p. 200-38.
- [4] V. Koissin, D.S. Ivanov, S.V. Lomov, Verpoest I. "Fibre distribution inside yarns of textile composite: geometrical and fe modelling," *TexComp-8 Int Conference*. Nottingham, UK2006.
- [5] Karahan M, Lomov SV, Bogdanovich AE, Mungalov D, Verpoest I. "Internal geometry evaluation of non-crimp 3D orthogonal woven carbon fabric composite, " *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(9):1301-11.
- [6] Long AC, Brown LP. 8 - "Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen," Composite Reinforcements for Optimum Performance: Woodhead Publishing; 2011
- [7] Yang X. "Dynamic simulation of 3D weaving process," Manhattan, Kansas: KANSAS STATE UNIVERSITY; 2015.
- [8] MATLAB version R2015b, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2015.
- [9] Weisstein, Eric W. "Ellipse." From MathWorld--A Wolfram Web Resource.
<http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html>
- [10] Isart N, Mayugo JA, Blanco N, Ripoll L, Solà A, Soler M. "Geometric model for 3D through-thickness orthogonal interlock composite, " *Composite Structures*. 2015;119:787-98.
- [11] Long AC, Clifford MJ. 1 - "Composite forming mechanisms and materials characterisation, " *Composites Forming Technologies*: Woodhead Publishing; 2007. p. 1-21.
- [12] Gommer F, Brown LP, Wedgwood KCA. "Analytical method using gamma functions for determining areas of power elliptical shapes for use in geometrical textile models, " *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;81:222-4.

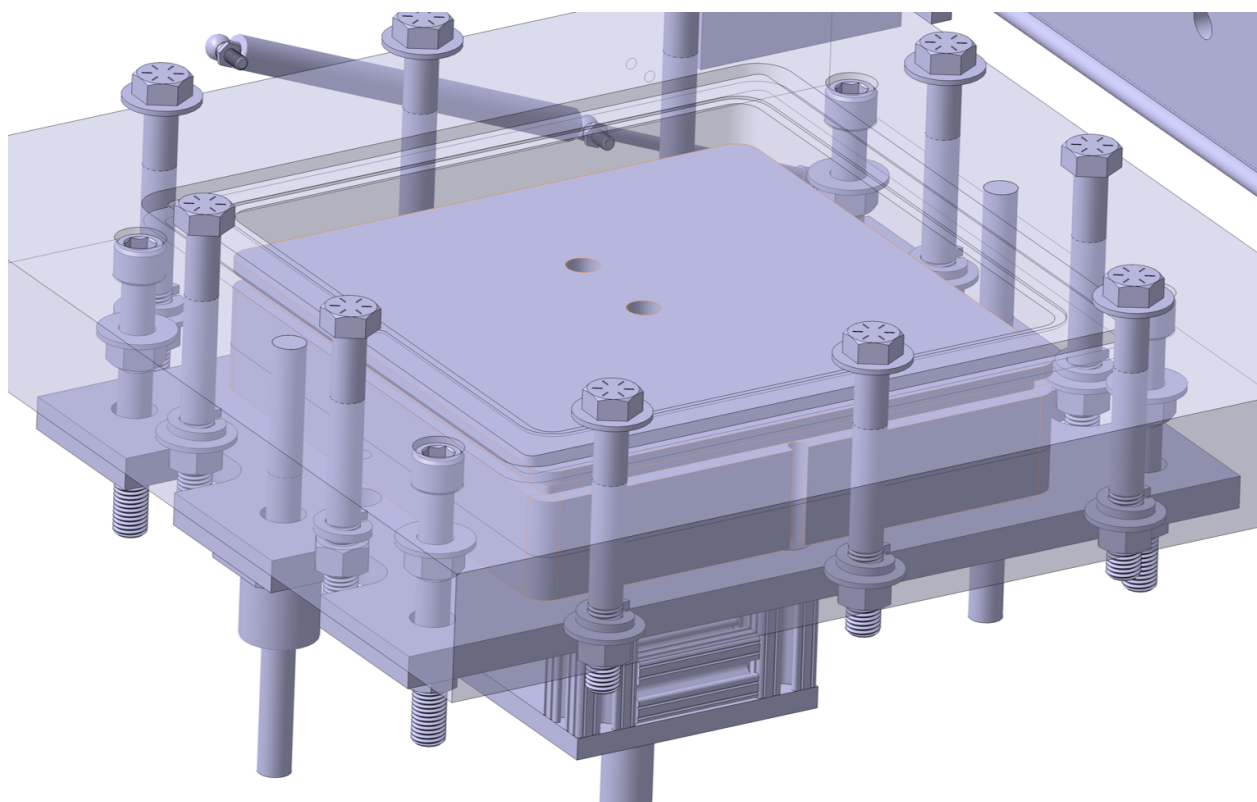
ANNEXE E DESIGN DU MOULE À ÉPAISSEUR VARIABLE



Vue isométrique globale du moule à fond variable



Vue de dessous du système à fond variable



Vue de dessus du système à fond variable

ANNEXE F PLAN DU MOULE RTM-CADRE

16151413121110987654321

1. CE DESSIN REPRÉSENTE L'ASSEMBLAGE D'UN MOULE PERMETTANT DE FABRIQUER DES PLAQUES EN COMPOSITE DE 13X13po PRODUIT A L'AIDE D'UN MÉTHODE L-RTM

2. TOUTES LES DIMENSIONS SONT EN POUCES

3. TOUTES LES PIÈCES DÉTAILLÉES SUR CE DESSIN SONT USINÉES (EXCLUANT LES PIÈCES STD)

4. LES TOLÉRANCES ET NOTES GÉNÉRALES SONT INDICUÉES SUR CHAQUE PAGE SI NÉCESSAIRE

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

LISTE DE MATÉRIEL

ITEM	NUMÉRO DE PIÈCE	QTE	DESCRIPTION	MATÉRIAU	NOTES
-01	PLAQUE-3D001	1	MOULE PLAQUE 3D		
1	-1	1	MOULE INFÉRIEUR	ALUMINIUM	
2	-2	4	CADRE	ALUMINIUM	
3	-3	1	MOULE SUPÉRIEUR	ALUMINIUM	4 ÉPAISSEURS DIFFÉRENTES (0.215, 0.224, 0.230, 0.506 IN)
4	-4	2	POUTRE EN H SUPÉRIEURE	ACTIER	
5	-5	2	POUTRE EN H INFÉRIEURE	ACTIER	PIÈCE STD: 4INX13LBS./Lin.Ft. PIÈCE STD: 4INX13LBS./Lin.Ft.

VUE ISOMÉTRIQUE

1

2

3

4

5

Ce dessin est notre propriété.
Il ne peut être transmis sans
notre accord préalable.

DESSINÉ PAR: JULIEN BRAZEAU-SÉGUIN

DATE: 23/05 2017

VÉRIFIÉ PAR: LOUIS LABERGE

DATE: 23/05 2017

REVISE PAR:

DATE:

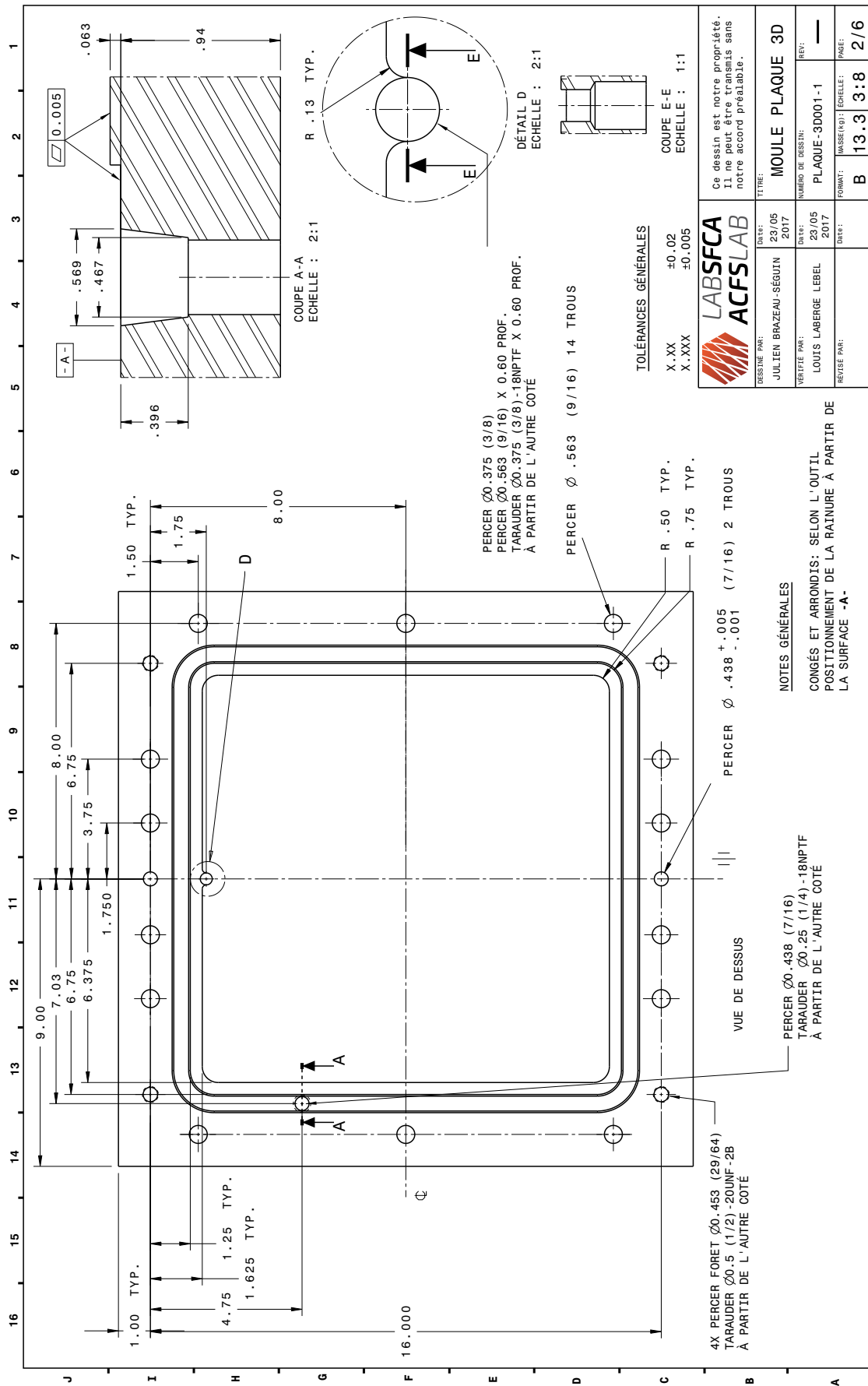
TITRE: MOULE PLAQUE 3D

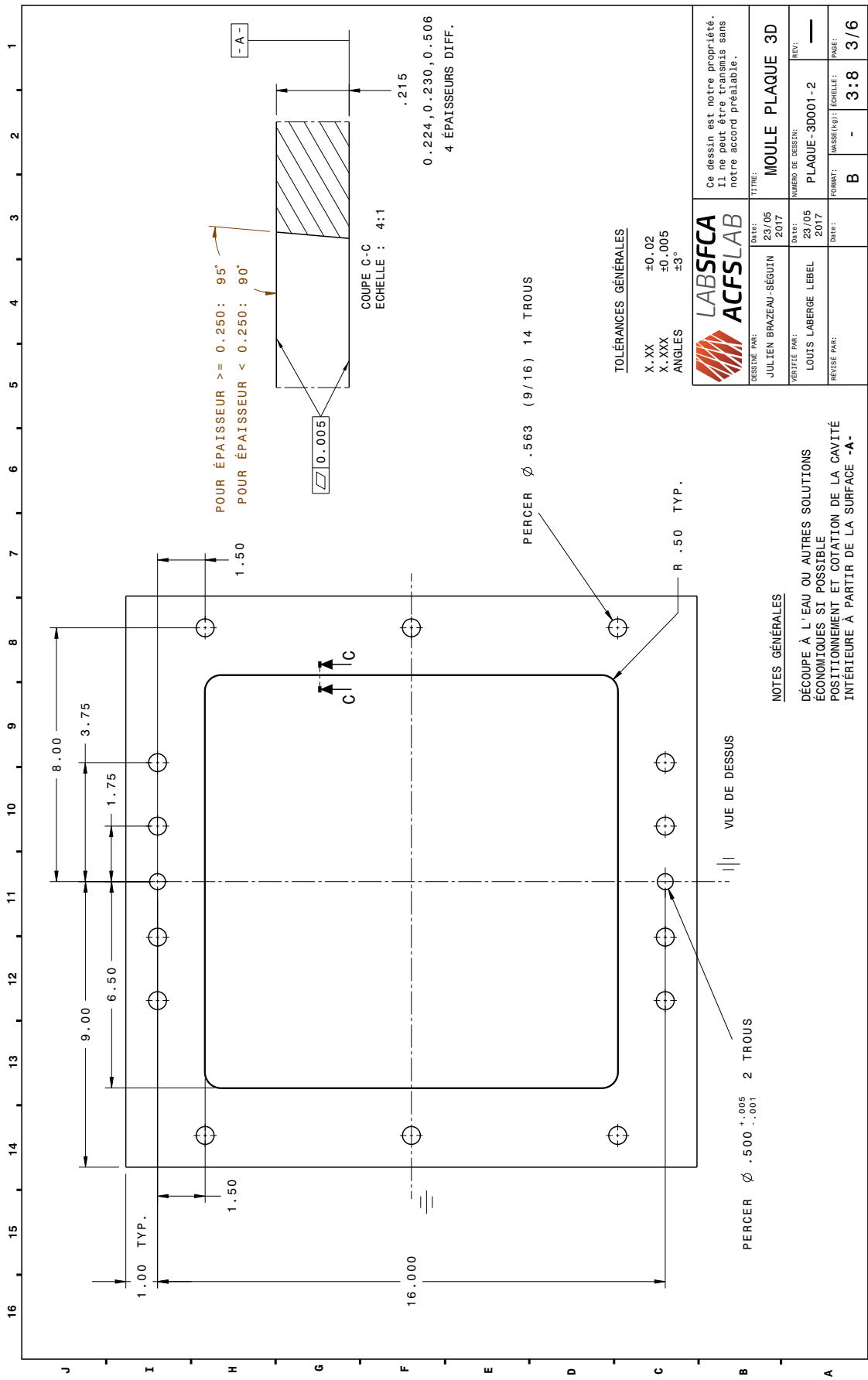
NUMÉRO DE DESSIN: PLAQUE-3D001

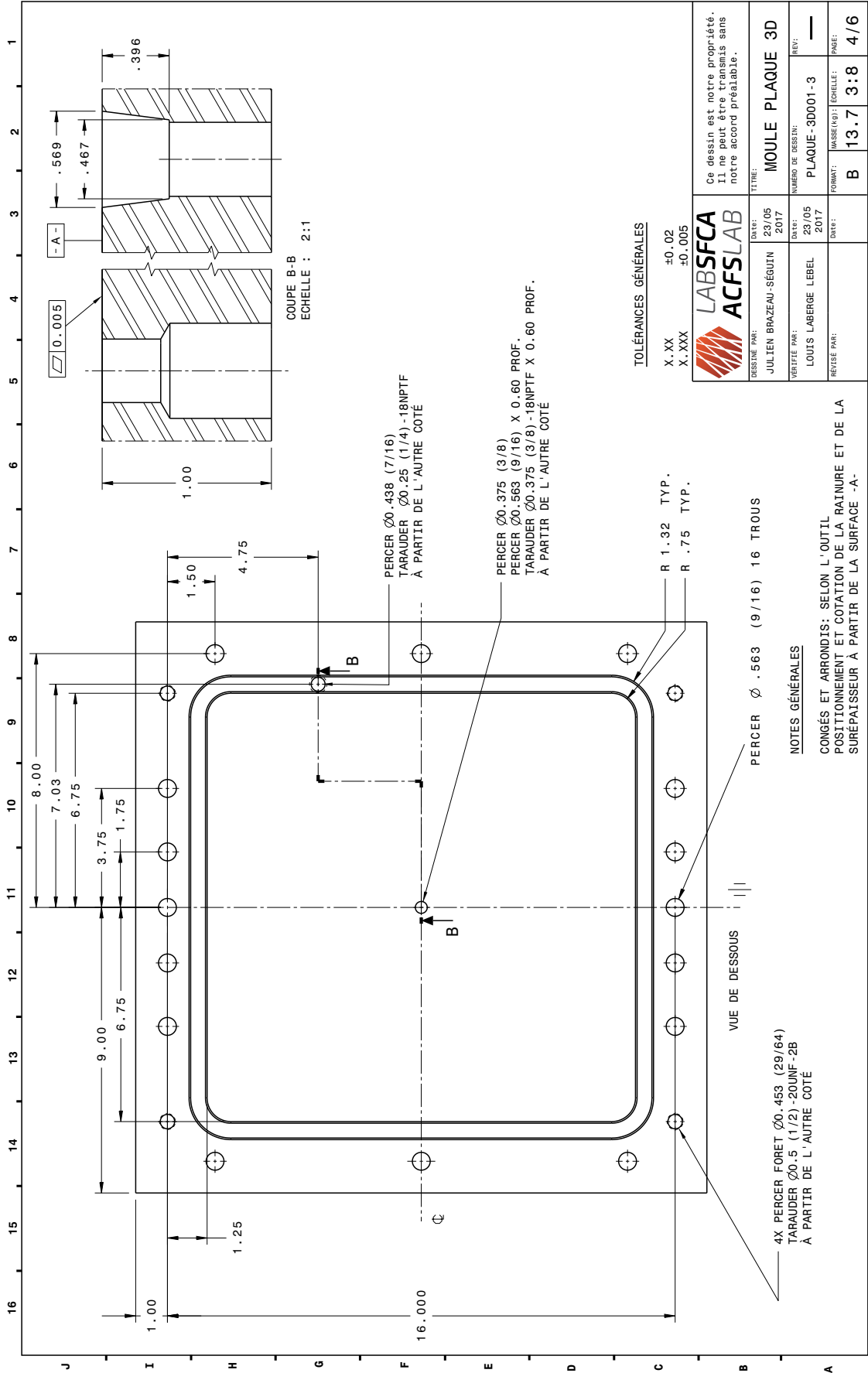
FORMAT: B 44.6 3:8 1/6

REVISIONS: —

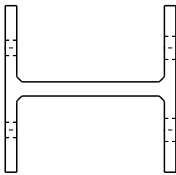
PAGES: 1/6



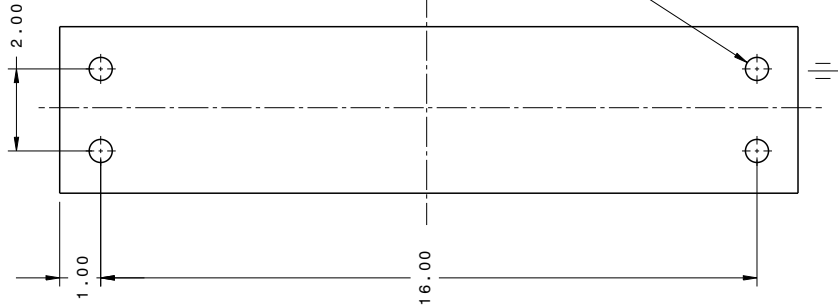




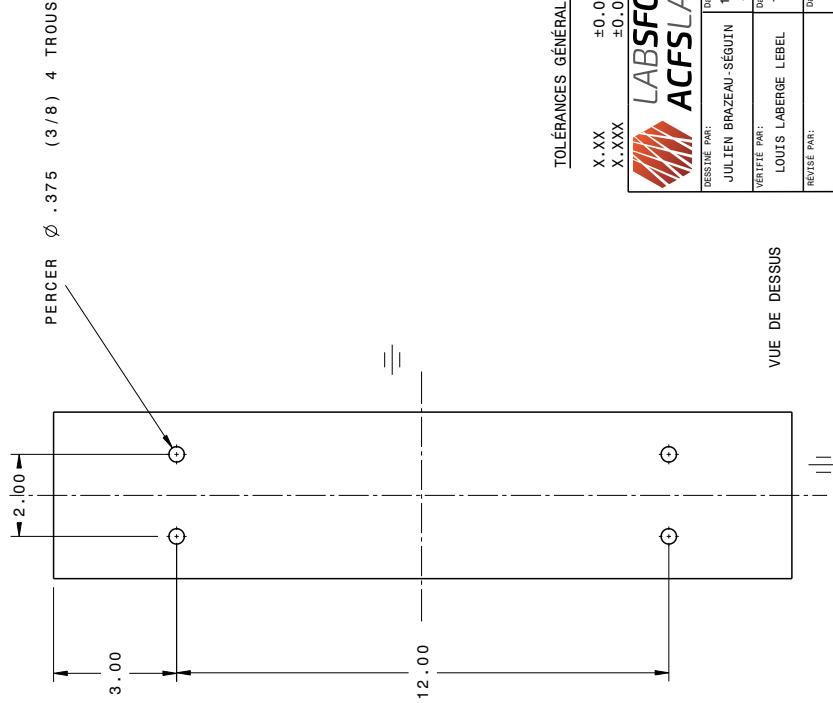
16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1



VUE DE FACE



VUE DE DESSOUS



VUE DE DESSUS

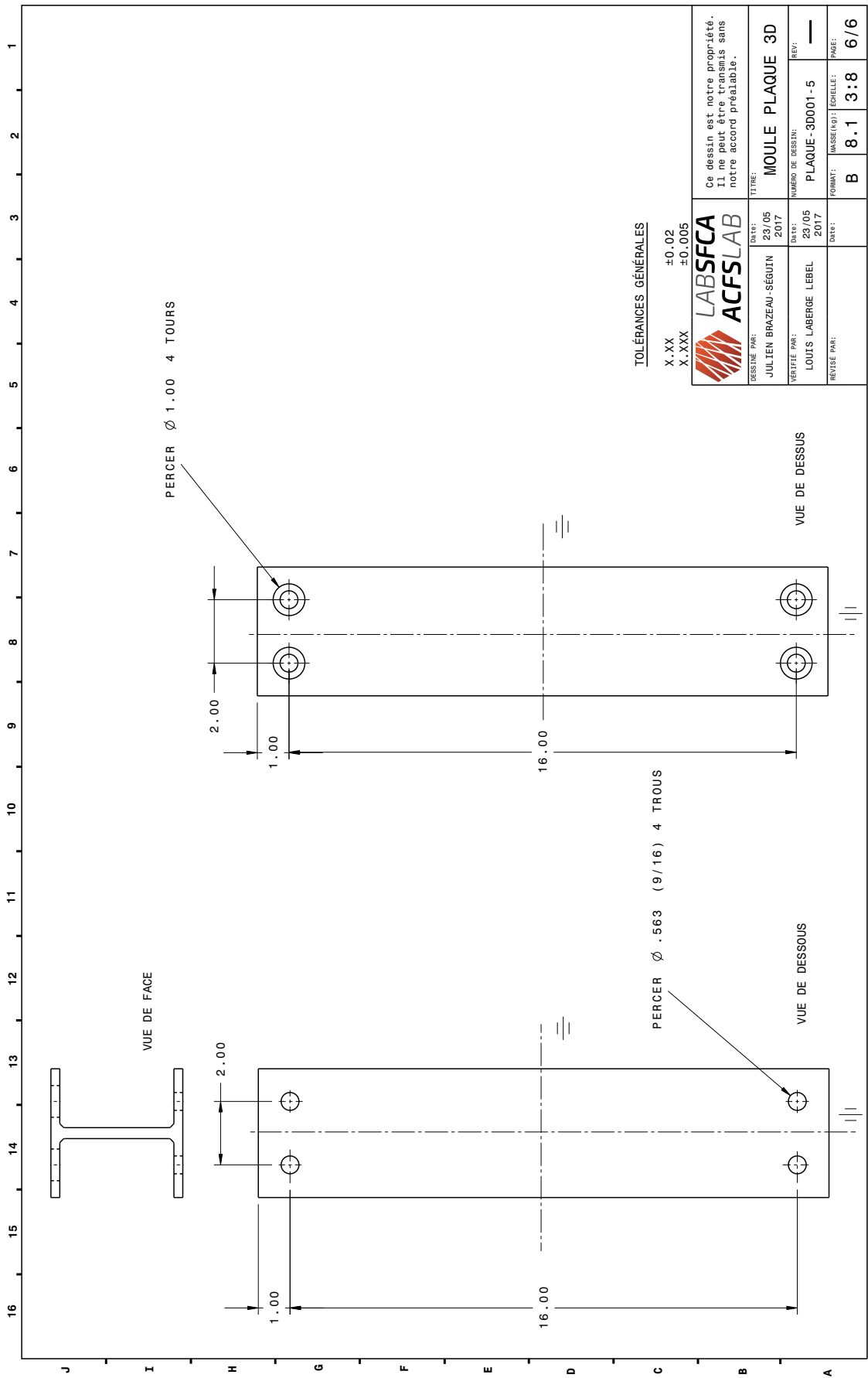
TOLÉRANCES GÉNÉRALES

X.XX ±0.02
X.XXX ±0.005

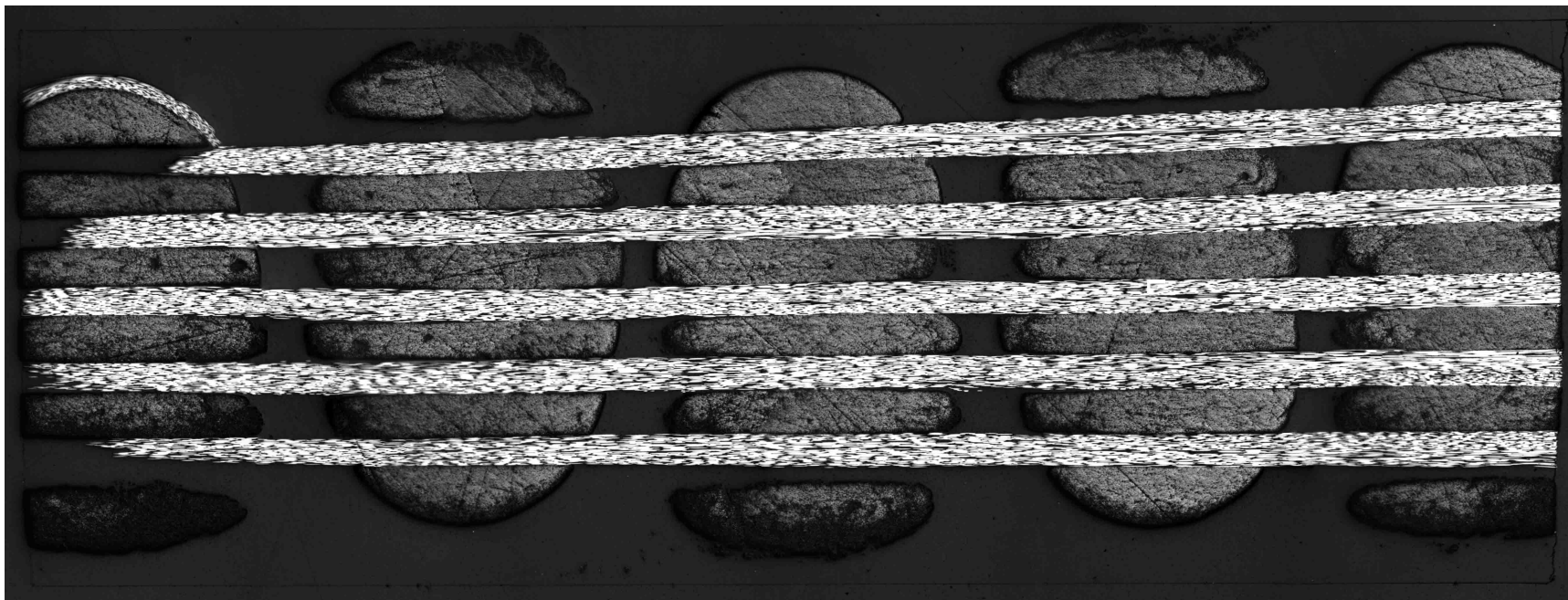


Ce dessin est notre propriété.
Il ne peut être transmis sans
notre accord préalable.

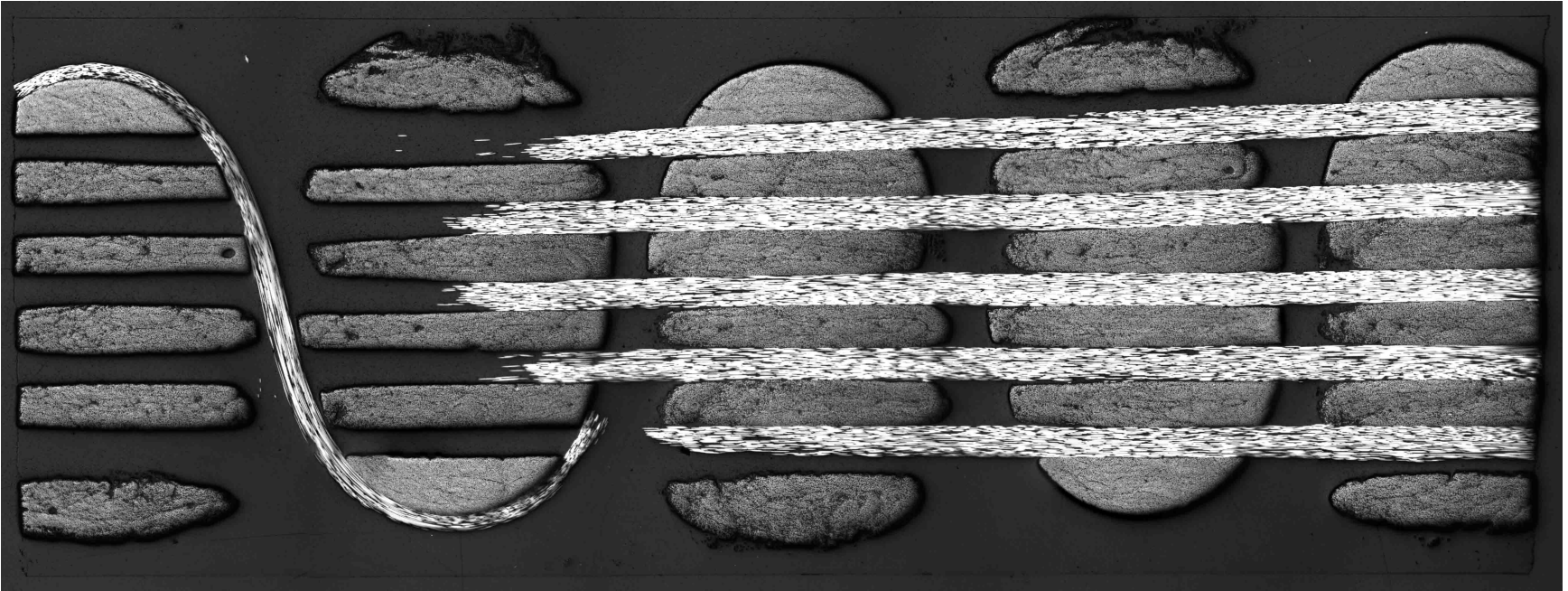
DESSINÉ PAR: JULIEN BRAZEAU-SÉGUIN	DATE: 17/05 2017	TITRE: MOULE PLAQUE 3D
VÉRIFIÉ PAR: LOUIS LABERGE LEBEL	DATE: 17/05 2017	NUMÉRO DE DESSIN: PLAQUE-3D001 - 4
RÉVISÉ PAR:	DATE:	FORMAT: B
		ÉCHELLE: 3:8
		PAGE: 5/6



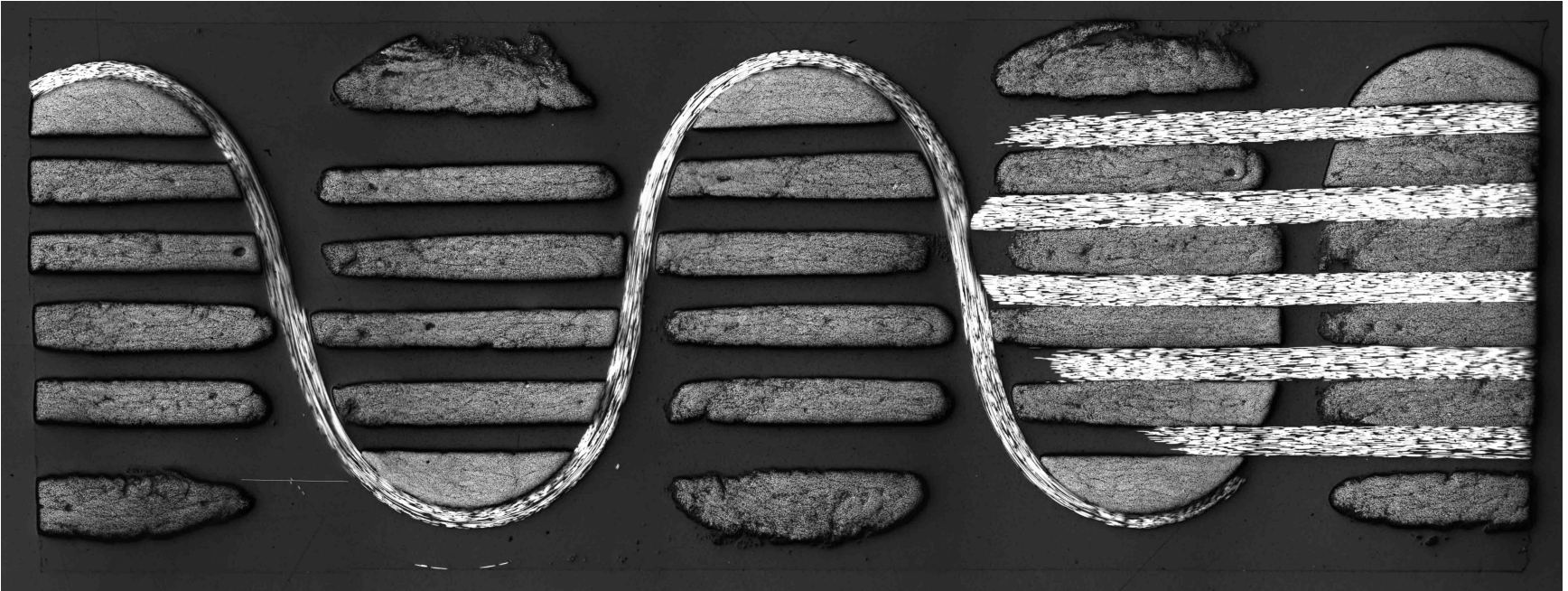
ANNEXE G SECTIONS COMPLÈTES DU TISSU NCS-2



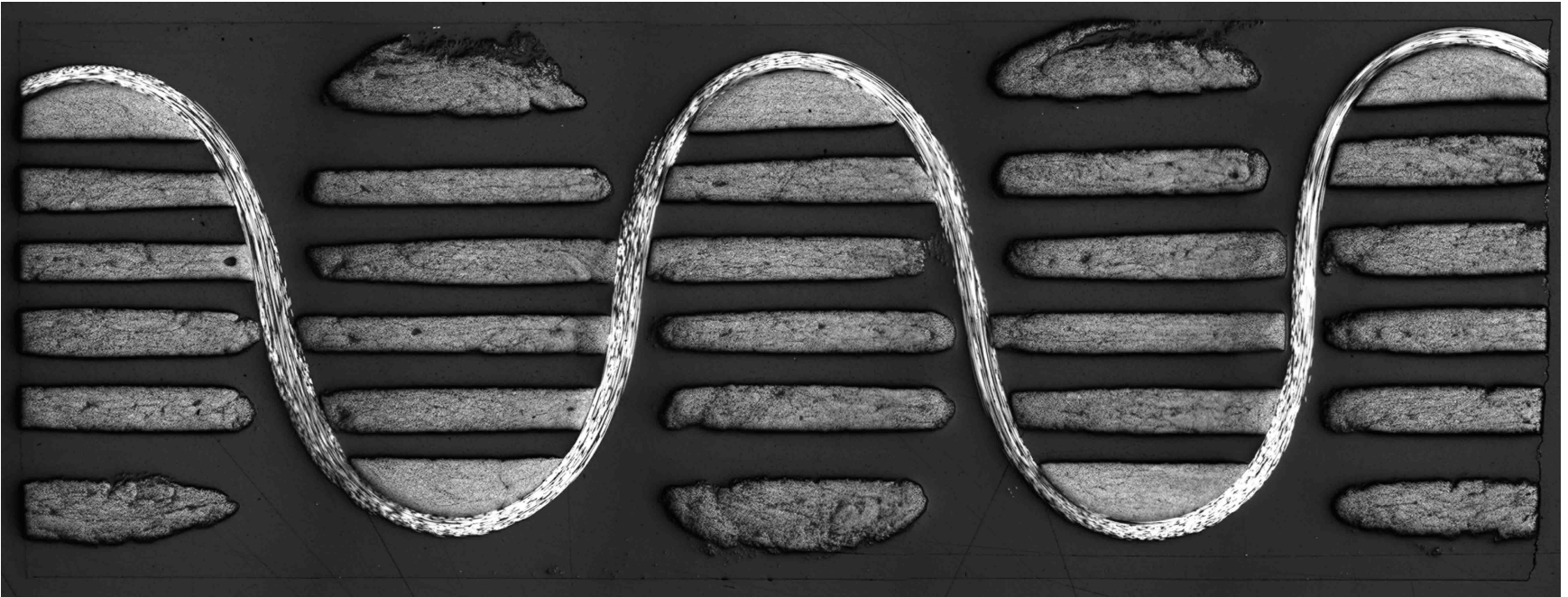
Section XZ1



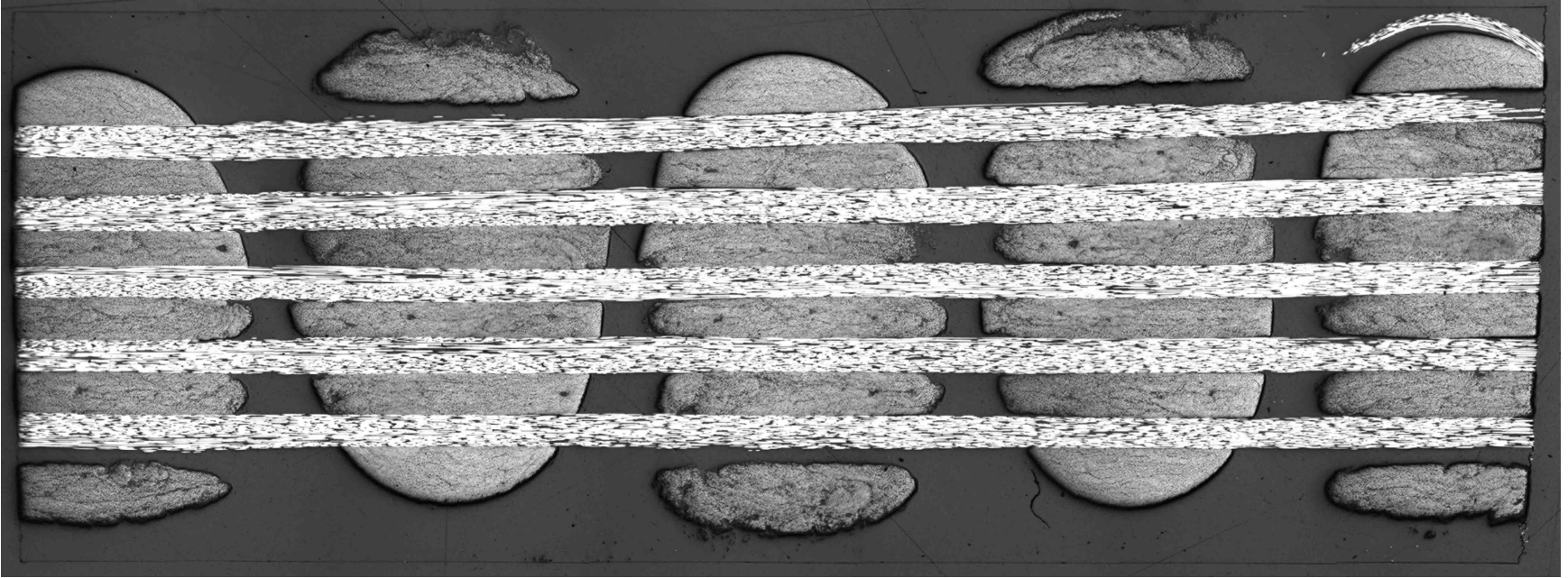
Section XZ2



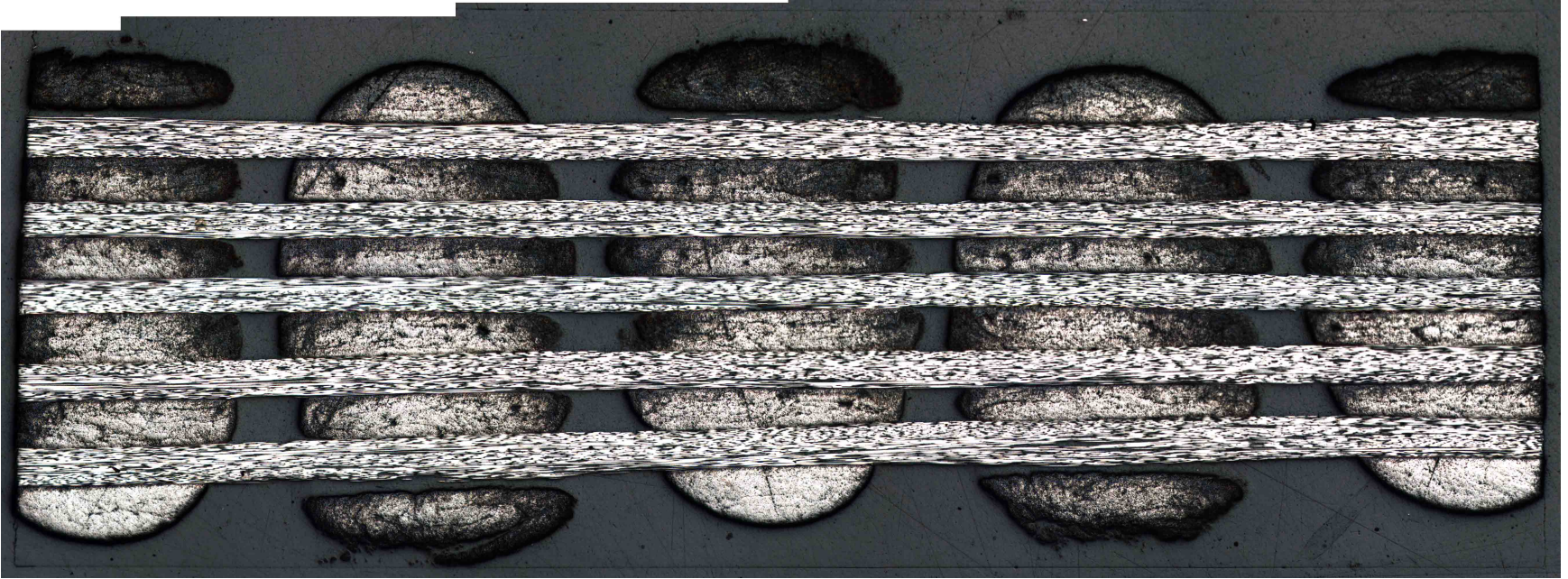
Section XZ3



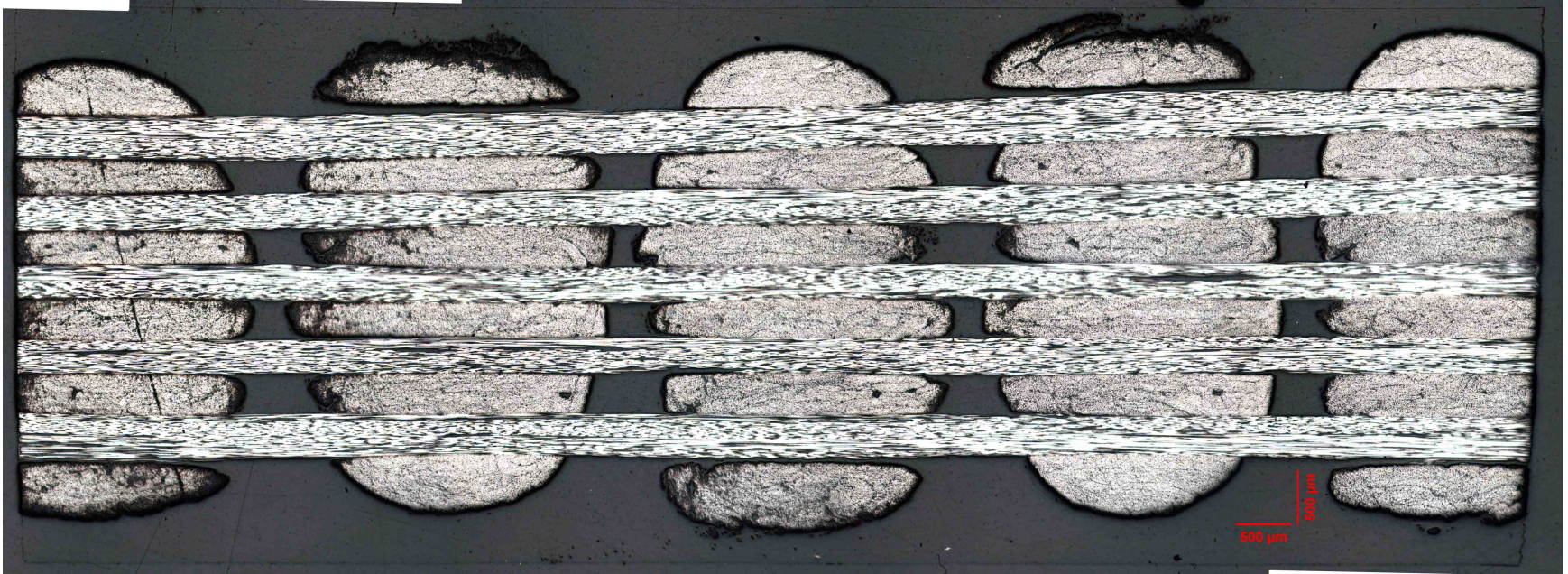
Section XZ5



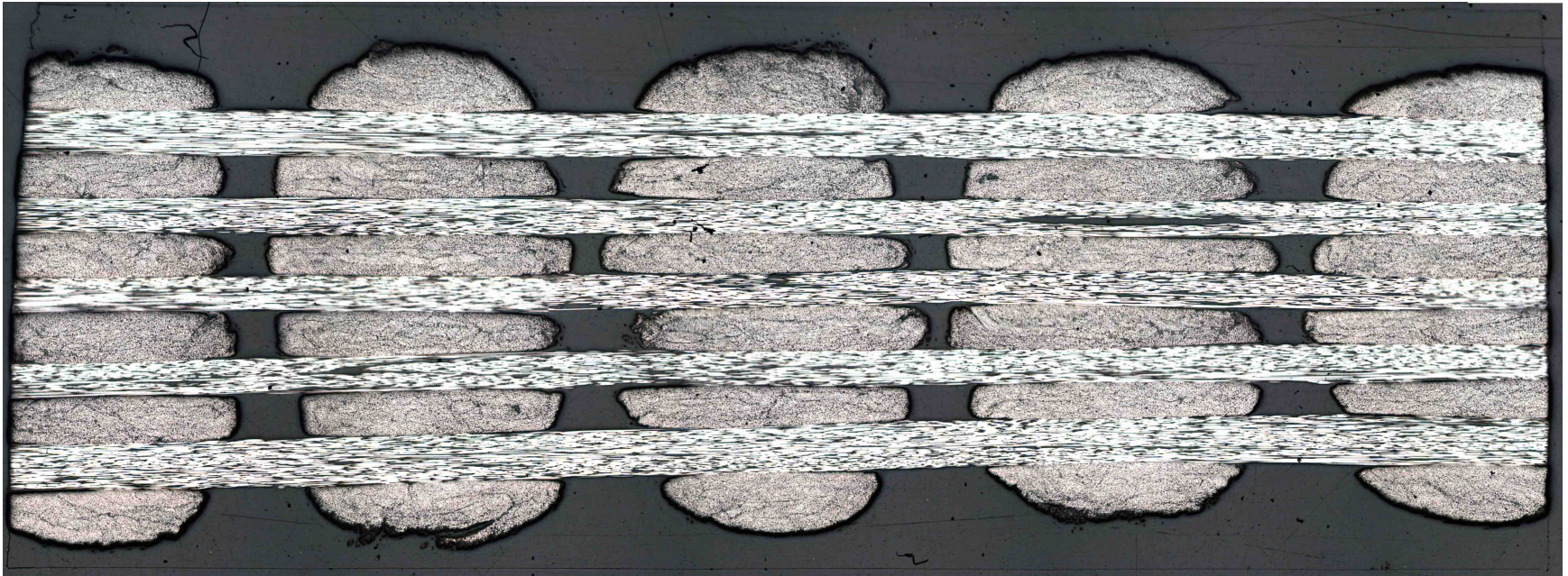
Section XZ8



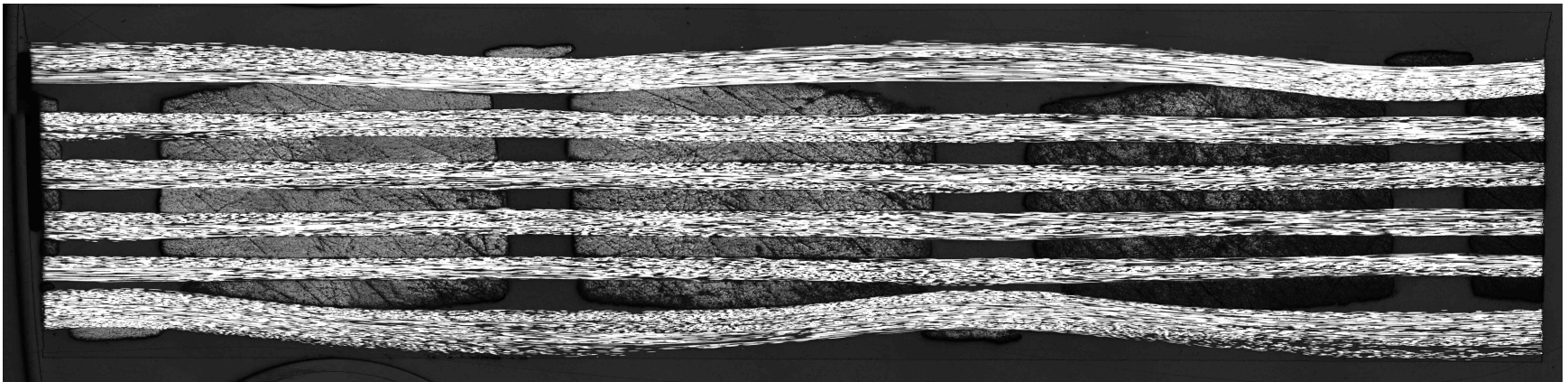
Section XZ9



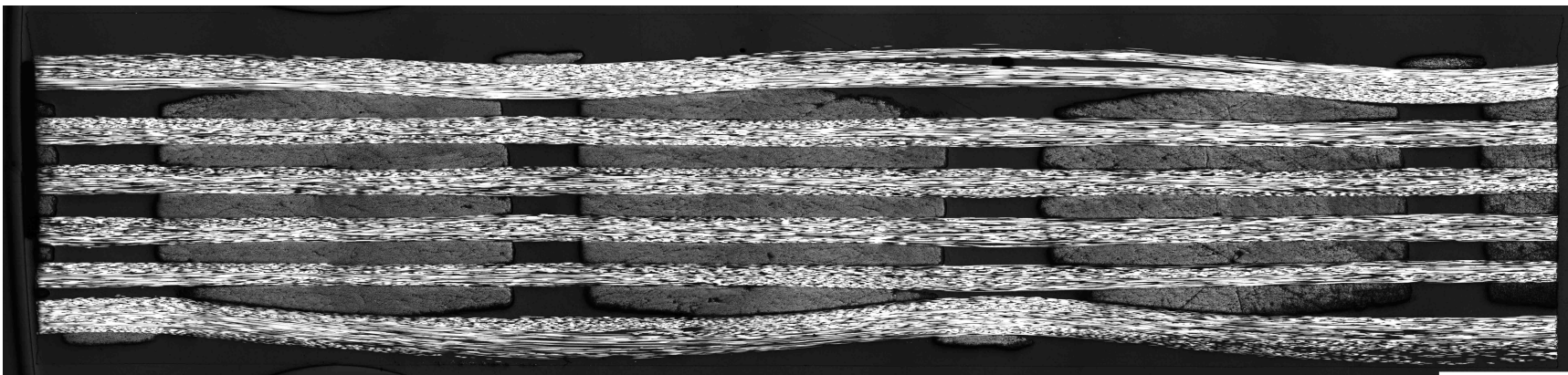
Section XZ11



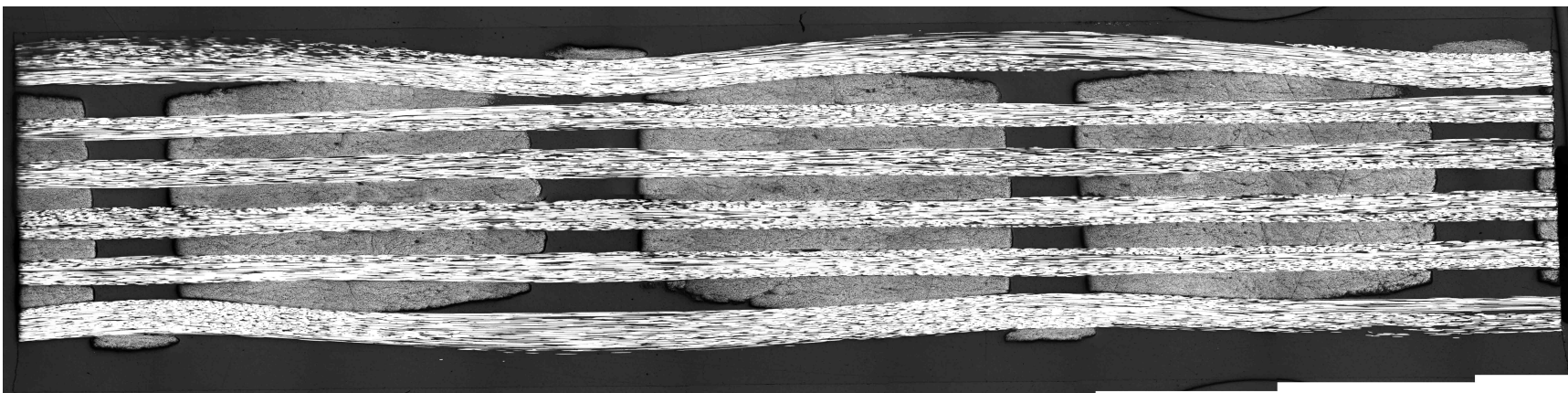
Section XZ13



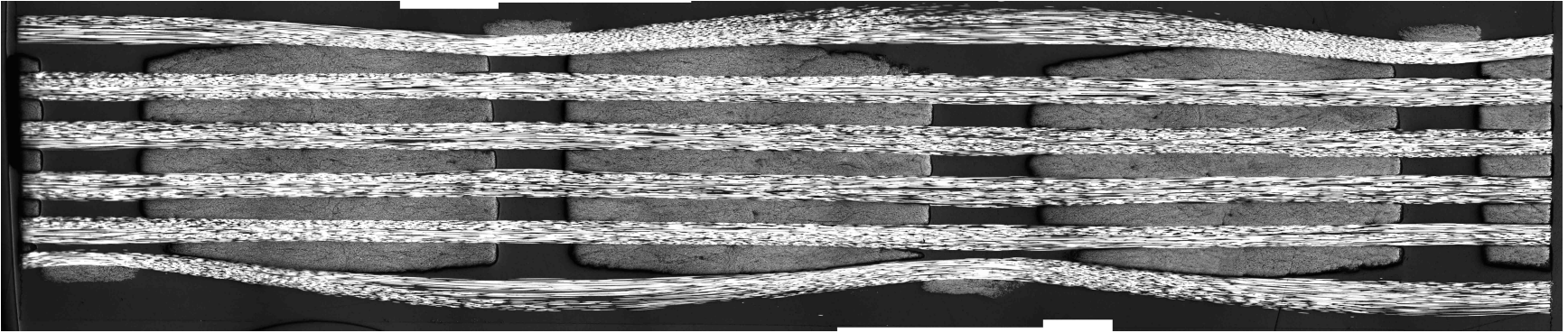
Section YZ1



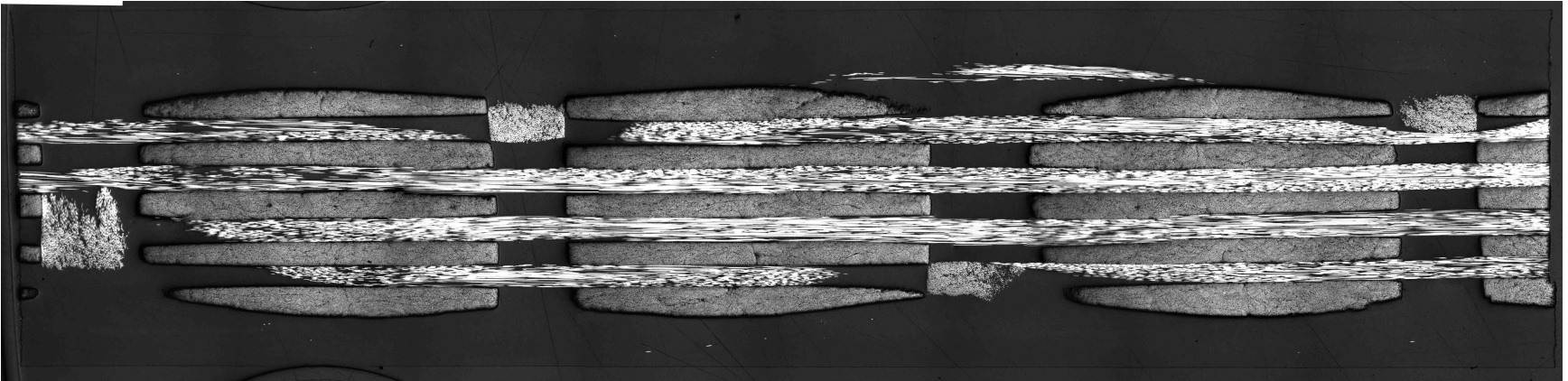
Section YZ2



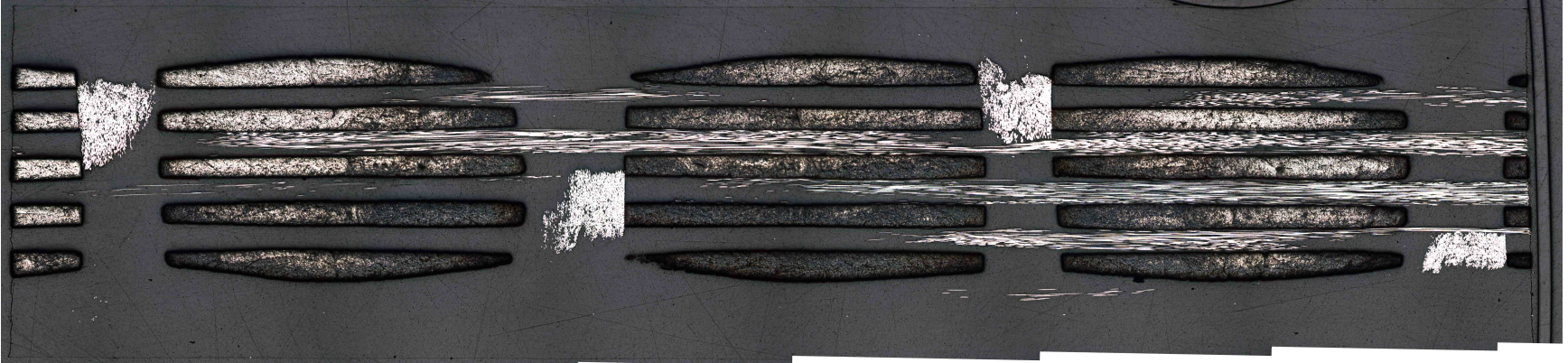
Section YZ3



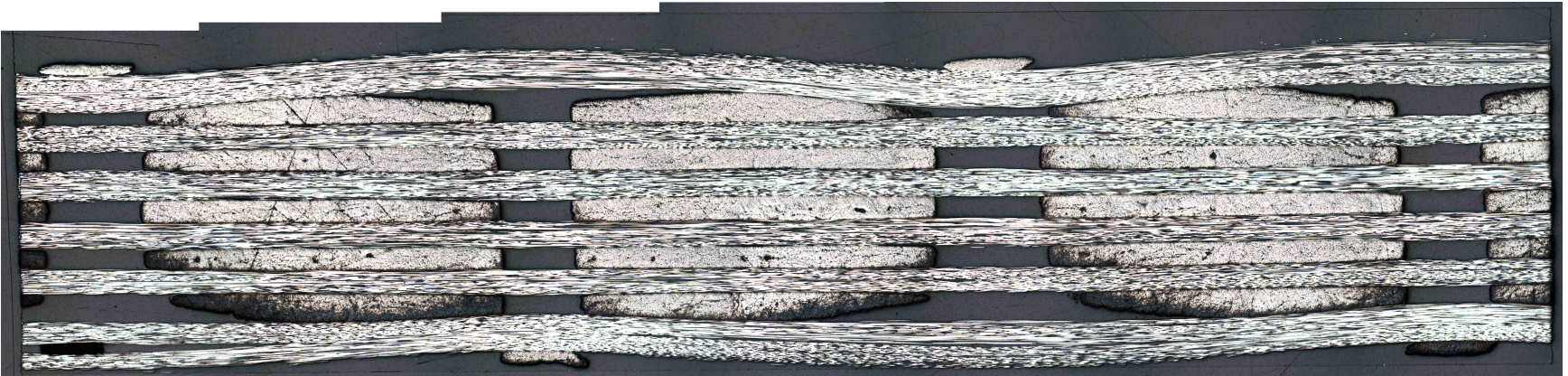
Section YZ5



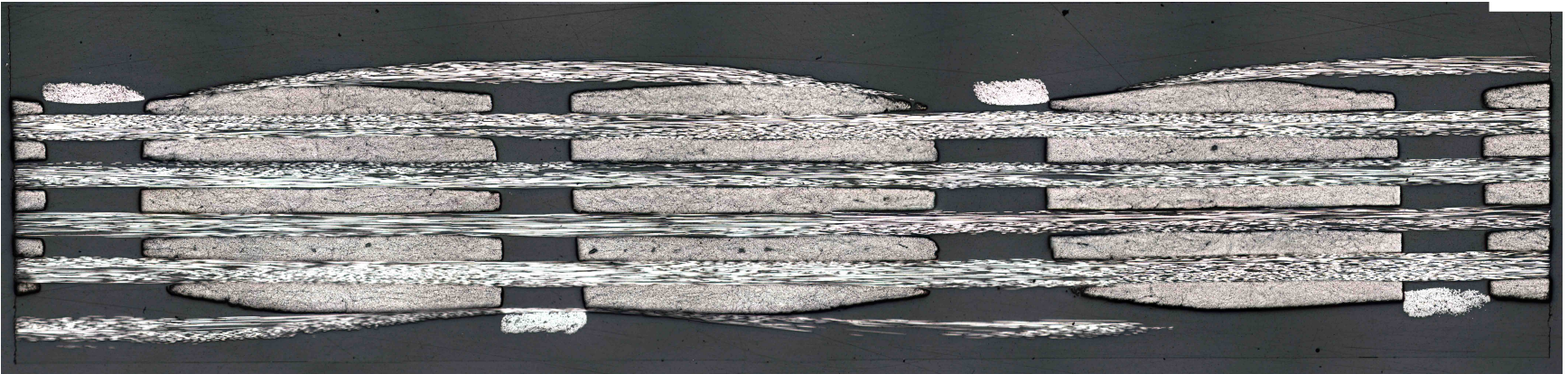
Section YZ8



Section YZ9



Section YZ11



Section YZ13

ANNEXE H PRÉSENTATION DES DONNÉES SUR LES TAUX DE FIBRES DES FILS MESURÉS

Taux de fibres du tissu NCS-2					
NCS-2					
SECTION YZ1		SECTION YZ9		SECTION XZ5	SECTION XZ13
		Aire (mm^2)			
Fils bourreurs	Fils de Liage	Fils bourreurs	Fils de liage	Fils de trame	
Colonne #1	60,3	Colonne #1		Colonne #1	
60,9	66,3	61,8		44,4	58,4
58,9	62,8	60,6		57,0	59,9
58,5	60,8	57,0		47,6	48,1
62,5		56,5		52,9	54,5
63,3		60,9		51,6	52,6
Colonne #2		Colonne #2		64,0	54,4
56,4		58,8	N/A	Colonne #2	
60,1		57,0		66,3	58,8
61,2		56,4		54,4	54,7
63,0		57,1		49,9	50,6
64,1		59,7		50,7	53,1
Colonne #3		Colonne #3		48,3	52,9
57,4		61,5		38,7	46,5
60,4		59,0		Colonnes #3	
61,9		59,0		46,0	55,4
62,6		55,6		51,2	53,5
58,0		59,1		49,6	51,9
				51,4	49,6
				52,7	52,9
				65,0	54,0

Taux de fibres du tissu SERGÉ-3	
SERGÉ-3	
SECTION YZ	SECTION XZ
Aire (mm^2)	
Fils de chaîne	Fils de trame
Zone #1	
64,0	62,7
66,7	62,4
67,5	64,1
65,3	62,0
59,2	63,0
Zone #2	
63,2	61,7
63,7	65,8
59,6	65,0
59,7	58,0
61,3	61,8
Zone #3	
67,1	61,1
64,2	63,3
66,6	64,0
67,0	63,7
61,0	63,5